ORSAY
n° d'ordre : 475

UNIVERSITE DE PARIS-SUD

CENTRE D'ORSAY

THESE

présentée

Pour obtenir

Le TITRE de DOCTEUR INGENIEUR

SPECIALITE : ENERGETIQUE (physique des réacteurs)

PAR

Melle KAMHA Enaam

SUJET : CONTRIBUTION A L'ELABORATION ET A LA QUALIFICATION D'UN SCHEMA DE CALCUL POUR LA GESTION DES REACTEURS PWR, A L'AIDE DU SYSTEME NEPTUNE - SUIVI DU REACTEUR FESSENHEIM 2

soutenue le 25 MAI 1981 devant la Commission d'examen

MM. JEAN Président

CHABRILLAC

SCHWARTZ

THOMAS

VIDAL

Ce document doit être remis à l'étudiant à l'issue de la soutenance.

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41547318_0034

ORSAY
n° d'ordre : 475

UNIVERSITE DE PARIS-SUD

CENTRE D'ORSAY

THESE

présentée

Pour obtenir

Le TITRE de DOCTEUR INGENIEUR

SPECIALITE : ENERGETIQUE (physique des réacteurs)

PAR

Melle KAMHA Enaam

SUJET : CONTRIBUTION A L'ELABORATION ET A LA QUALIFICATION D'UN SCHEMA DE CALCUL POUR LA GESTION DES REACTEURS PWR, A L'AIDE DU SYSTEME NEPTUNE - SUIVI DU REACTEUR FESSENHEIM 2

soutenue le 25 MAI 1981 devant la Commission d'examen

MM. JEAN Président

CHABRILLAC

SCHWARTZ

THOMAS

VIDAL

Ce document doit être remis à l'étudiant à l'issue de la soutenance.

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

TABLE DES MATIERES

Pages

INTRODUCTION GÉNÉRALE 3

Chapitre I : PRÉSENTATION DU COEUR DU RÉACTEUR DE FESSENHEIM
PRÉSENTATION DES CODES, MÉTHODES DES CALCULS 7

I.1 - PRESENTATION DU COEUR DU REACTEUR DE FESSENHEIM 9

I.2 - PRESENTATION DES CODES, METHODES DES CALCULS 23

Chapitre II : CALCUL D'UNE CARTE D'ACTIVITÉ SUR LE COEUR NEUF. ETUDE DE SENSIBILITÉ ET CHOIX D'UN SCHÉMA DE REPRÉSENTATION 35

INTRODUCTION 37

II.1 - CALCUL DE TRANSPORT 39

II.1.1 - Effet de la lame d'eau 39

II.1.2 - Présentation de la chambre à fission 41

II.1.3 - Description des configurations multicellules 43

II.1.4 - Mise en oeuvre d'APOLLO 44

II.1.5 - Constantes pour le calcul de diffusion 45

II.2 - CALCUL DU COEUR A 2 DIMENSIONS 53

Introduction 53

II.2.1 - Calcul du coeur aux éléments finis, BILAN 53

II.2.1.1 - Mise en oeuvre du code BILAN 53

II.2.1.2 - Calcul de l'activité 54

II.2.1.3 - Interprétation des résultats 56

II.2.1.4 - Conclusion 58

Pages

II.2.2 - Calcul du coeur aux différences finies DIANE 66

II.2.2.1 - Mise en oeuvre du code DIANE 66
II.2.2.2 - Calcul de l'activité 66
II.2.2.3 - Interprétation des résultats 67
II.2.2.4 - Conclusion 68

II.2.3 - Comparaison des résultats de calcul du coeur DIANE et BILAN 70

II.2.3.1 - Calcul d'activités sans l'effet de la chambre à fission 71
II.2.3.2 - Calcul d'activités avec l'effet de la chambre à fission 72
II.2.3.3 - Conclusion 78

II.2.4 - Influence du polynôme d'interpolation et du maillage de calcul sur le calcul du flux 78

II.2.4.1 - Effet des polynômes d'interpolation de flux 78
II.2.4.2 - Effet de maillage du calcul 85
II.2.4.3 - Conclusion 88

II.3 - INFLUENCE DU COUPLAGE THERMOHYDRAULIQUE ET DE L'EFFET 2D/3D SUR LE CALCUL D'ACTIVITE 90

II.3.1 - Influence du couplage thermohydraulique 90

II.3.2 - Effet 2D/3D 90

II.4 - DISPERSION DES RESULTATS EXPERIMENTAUX 92

II.5 - ETUDES COMPLEMENTAIRES 103

II.5.1 - Effet de la variation du spectre dans les assemblages périphériques 103

II.5.2 - Effet de la méthode de calcul des constantes de réflecteur 104

CONCLUSION 110

Pages

Chapitre III : SUIVI ET INTERPRÉTATION DE L'ÉVOLUTION DU PREMIER CYCLE 115

INTRODUCTION 117

III.1 - PRINCIPE DE LA METHODE DE CREATION DES BIBLIOTHEQUES 119

III.1.1 - Exposé du problème 119

III.1.2 - Simplifications utilisées lors du calcul des contre-réactions 119

III.1.3 - Principe du calcul des contre-réactions 120

III.1.4 - Quelques données des calculs d'assemblage 123

III.2 - CALCUL DU COEUR AU COURS DU PREMIER CYCLE A DEUX DIMENSIONS 125

III.2.1 - Calcul du coeur avec de couplage thermohydraulique par CRONOS 126

III.2.1.1 - Interprétation des résultats 126

III.2.2 - Calcul du coeur sans contre-réactions par BILAN 141

III.2.2.1 - Interprétation des résultats 141

III.2.3 - Conclusion 152

III.2.4 - Etude paramétrique de l'effet des contre-réactions 153

III.2.4.1 - Réactivité 154

III.2.4.2 - Distribution de puissance 154

III.2.4.3 - Valeurs d'activités 155

III.2.4.4 - Taux de combustion en fin de cycle 155

III.2.4.5 - Conclusion 156

III.3 - ETUDES COMPLEMENTAIRES DE CALCUL DU PREMIER CYCLE 168

III.3.1 - Test d'une représentation plus fine du couplage thermohydraulique dans des zones de fort gradient de distribution de puissance 168

III.3.1.1 - Résultats 168

III.3.1.2 - Conclusion 169

Pages

III.3.2 - Evaluation de l'effet d'une erreur éventuelle sur l'efficacité des grappes de poison consommable 172

III.3.2.1 - Résultats 172

III.3.2.2 - Conclusion 174

III.3.3 - Effet de l'ajustement des constantes de réflecteur sur les résultats du calcul de coeur 180

III.3.3.1 - Résultats et conclusions 181

III.4 - CALCUL DU COEUR A TROIS DIMENSIONS EN DEBUT DE CYCLE 194

III.4.1 - Interprétation des résultats 194

III.4.1.1 - Comparaison des valeurs d'activités entre l'expérience et le calcul 194

III.4.1.2 - Etude de l'effet 2D/3D en début de cycle 198

III.5 - CALCUL DES TAUX DE COMBUSTION EN FIN DE PREMIER CYCLE. DETERMINATION D'UN SCHEMA DE CALCUL VALABLE POUR L'ENSEMBLE DES CYCLES 229

III.5.1 - Influence du maillage sur les résultats de calculs de coeur à trois dimensions en début de cycle 229

III.5.2 - Influence du maillage sur les résultats des calculs du coeur au cours du premier cycle à deux dimensions 230

III.5.3 - Conclusion 232

CONCLUSION 240

Chapitre IV : CALCUL DU COEUR EN DÉBUT DE CYCLE 2 245

INTRODUCTION 247

IV.1 - BIBLIOTHEQUES DU CYCLE 2 252

IV.2 - CALCUL DU COEUR EN DEBUT DE DEUXIEME CYCLE A DEUX DIMENSIONS 253

Pages

IV.3 - INTERPRETATION DES RESULTATS 254

IV.3.1 - Résultats expérimentaux 254

IV.3.2 - Résultats du calcul et comparaisons calcul-expérience 254

CONCLUSION 263

CONCLUSION GÉNÉRALE 266

RÉFÉRENCES 272

ANNEXE 277

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé dans le cadre de la Section d'Etudes des Réacteurs à Eau Légère, Service d'Etudes de Réacteurs et de Mathématiques Appliquées au Centre d'Etudes Nucléaires de SACLAY (C.E.N.).

J'exprime toute ma reconnaissance à M. J. HOROWITZ, Directeur à l'Institut de Recherche Fondamentale au Commissariat à l'Energie Atomique, et à M. J. BUSSAC, Chef de Cabinet du Haut-Commissaire, pour avoir bien voulu m'autoriser à préparer cette thèse.

Que M. R. VIDAL, Directeur à FRAMATOME, qui a bien voulu assumer la direction de ma thèse, veuille trouver ici l'expression de ma respectueuse reconnaissance.

Je désire exprimer mes vifs remerciements à M. J.P. SCHWARTZ, Chef du Service d'Etudes de Réacteurs et de Mathématiques Appliquées, pour son accueil et son soutien continuel qui m'ont permis d'aborder ce travail dans les meilleures conditions.

J'exprime ma profonde gratitude à M. J. BERGERON, dont les précieux enseignements et les suggestions éclairées m'ont permis de faire aboutir cette thèse.

La totalité de ce travail a été effectuée sous la responsabilité de M. J.B. THOMAS, Ingénieur au Service d'Etudes de Réacteurs et de Mathématiques Appliquées. C'est grâce à sa compétence, à l'aide continuelle et amicale qu'il m'a accordée, que cette étude a pu être menée à bien. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude.

Je remercie MM. M. JEAN, Professeur de physique à l'Université de PARIS XI, et M. CHABRILLAC, Professeur à l'Institut National des Sciences et des Techniques Nucléaires et Chef de la Division Procédés FRAMATOME, d'avoir bien voulu accepter d'être membres du jury.

Je remercie toutes les personnes du SERMA pour l'intérêt qu'elles ont manifesté à l'égard de ce travail, en particulier Mlle D. JAGER pour l'aide efficace et sympathique qu'elle m'a apportée.

Je ne manquerai pas de rappeler la constante sympathie et la compréhension de Mme F. LEBRUN et sa contribution à la présentation matérielle de ce travail.

INTRODUCTION GENERALE

L'objectif de cette étude est la définition, à partir du système de codes NEPTUNE [4], d'un schéma de calcul neutronique actualisé pour le suivi des réacteurs de puissance à eau légère pressurisée et son application au suivi du coeur du réacteur FESSENHEIM 2.

Cette étude fait suite aux travaux de qualification déjà entrepris sur des réacteurs à eau légère pressurisée, en particulier [30] et [11].

Les orientations spécifiques de ce travail sont les suivantes :

- Le coeur du réacteur étudié (FESSENHEIM 2) est constitué d'un réseau 17 x 17 représentatif de l'ensemble des réacteurs de conception récente et du contrat programme.

- L'étude a porté non seulement sur l'évolution de la réactivité et des distributions de puissance moyenne par assemblage, qui ne sont pas directement accessibles par l'expérience, mais également sur l'interprétation des distributions d'activités des chambres de fission en évolution, seuls éléments de comparaison directe avec l'expérience.

- L'analyse a été orientée vers le traitement automatique de l'ensemble des cycles et des états de puissance du réacteur :

  . méthodes et procédures de calcul directement utilisables en routine, à un coût raisonnable ;

  . traitement d'un choix de situations représentatives de l'essentiel des problèmes que l'on peut rencontrer au cours des différents cycles.

Une attention particulière a été portée aux aspects suivants :

- description des assemblages au niveau du calcul de transport : influence de la lame d'eau entre assemblages, prise en compte des chambres de fission ;

- options du calcul de diffusion: influence du maillage de calcul et du degré du polynôme d'interpolation du flux sur les distributions de puissance intégrées et les distributions locales de flux ;

- sensibilité des distributions de puissance et d'activité dans le coeur à divers paramètres :

  . constantes de réflecteur
  . calcul de poison consommable
  . représentation homogène et à larges mailles des assemblages.

Dans cette étude, nous avons cherché à respecter les contraintes du suivi de coeur :

- prise en compte des indicateurs expérimentaux, mesures des taux de réaction de fission de l'uranium 235 (les activités) dans les chambres de fission. Une méthode d'interprétation automatique a été testée, comprenant :

  . l'élaboration des sections d'activation en évolution pour les différents types d'assemblages ;
  . le choix de polynômes d'interpolation conduisant à une valeur locale de flux convenable au centre de l'assemblage ;
  . un dépouillement automatique des cartes expérimentales d'activités à deux et à trois dimensions.

- définition d'un schéma aboutissant à un volume et des coût de calcul compatibles avec une utilisation de routine. De plus, la comparaison des calculs bidimensionnels et tridimensionnels permet d'évaluer les performances d'un schéma de clacul à deux dimensions et de lui apporter d'éventuelles améliorations.

Les situations étudiées de façon approfondie pour la qualification du schéma de calcul sont :

- le début de vie du coeur, qui représente un état privilégié (combustible neuf et homogène axialement) ;

- l'évolution du premier cycle qui permet de mettre en évidence les dérives de réactivité et de distribution de flux ;

- le début du deuxième cycle, qui est un test cumulant plusieurs effets :

  . effet de redistribution axiale de puissance
  . conséquences des erreurs sur le calcul des taux de combustion radiaux et axiaux au cours du premier cycle
  . effets divers de la dérive de réactivité, de l'influence des hétérogénéités, de l'interface coeur-réflecteur et des contre-réactions.

Nous espérons ainsi obtenir une qualification assez large pour être représentative des exigences imposées à un schéma de calcul de suivi de réacteur.

Le contenu de ce travail est exposé en quatre parties :

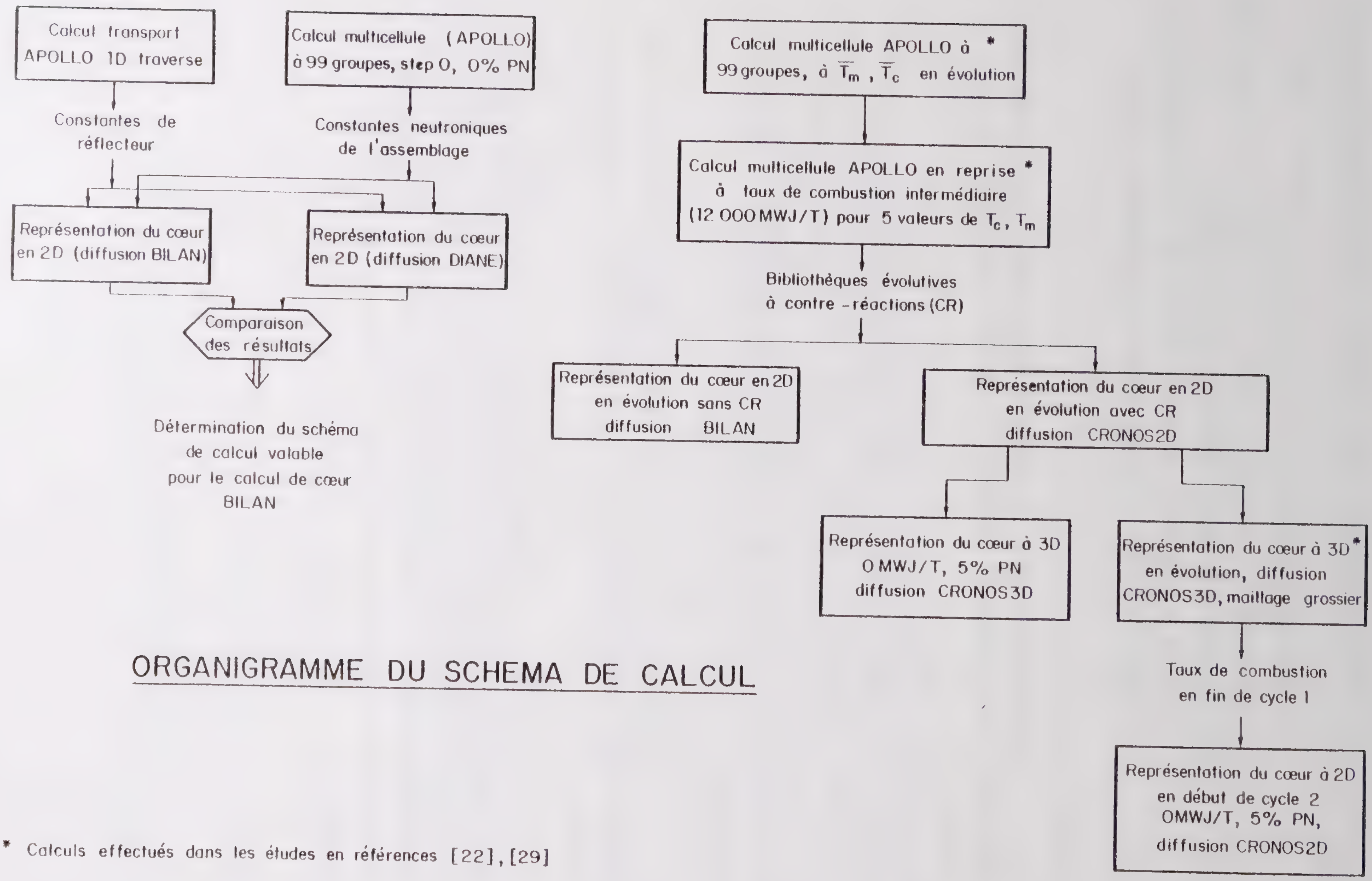
- Le chapitre I présente une description du coeur FESSENHEIM et de la chambre de fission qui a été utilisée pour les mesures d'activités dans les assemblages instrumentés et quelques rappels théoriques sur les codes et les méthodes de calculs.

- Le chapitre II expose une étude de sensibilité pour le choix d'un schéma de calcul et le calcul d'une carte d'activité sur le coeur neuf sans évolution.

- Le chapitre III donne l'ensemble des résultats nécessaires au dépouillement du premier cycle. Ces résultats sont obtenus à la suite de calcul d'évolution utilisant des bibliothèques évolutives à variations, qui permettent de prendre en compte les contre-réactions (effet Doppler, dû au changement de température du combustible, et effet dû à la variation de la température du modérateur).

- Le chapitre IV donne les résultats de calcul en début de deuxième cycle.

Un organigramme général de l'étude se présente sous la forme suivante :



ORGANIGRAMME DU SCHEMA DE CALCUL

* Calculs effectués dans les études en références [22], [29]

CHAPITRE I

I.1 - PRESENTATION DU COEUR DU REACTEUR DE FESSENHEIM

II.1 - PRESENTATION DES CODES. METHODES DES CALCULS

I.1 - PRESENTATION DU COEUR DU REACTEUR DE FESSENHEIM

I.1.1 - Généralités

Le réacteur est du type modéré et refroidi à l'eau légère sous pression en cycle fermé et utilise de l'oxyde d'uranium légèrement enrichi comme combustible.

Cette installation est conçue pour produire 2652 MW thermiques (dont 97,4 % produits dans le combustible) et la pression dans le circuit primaire est 155,1 bars. La hauteur active du coeur est de 365,8 cm et son diamètre équivalent à froid est de 304 cm, ce qui donne un rapport H/D de 1,2.

Les températures du réfrigérant sont :

. à chaud, puissance nulle ---------------------------- 286,1 °C
. à l'entrée à chaud, pleine puissance --------------- 284 °C
. à la sortie, à chaud, plaine puissance ------------- 321,8 °C
. moyenne du coeur, à chaud, pleine puissance -------- 302,9 °C

Le coeur est constitué de 157 assemblages au pas (à froid) de 21,504 cm ; l'ensemble est entouré par un baffle en acier SS-304.

Le premier coeur se compose de trois régions d'enrichissements différents qui ont approximativement le même volume, soit :

. 2,1 % pour la région I (53 assemblages)
. 2,6 % pour la région II (52 assemblages)
. 3,1 % pour la région III (52 assemblages)

Le schéma de chargement est indiqué sur la figure I.1.

I.1.2 - Description de l'assemblage

Chaque assemblage est constitué de 264 crayons de combustible et de 25 tubes guides formant un réseau 17 x 17 au pas 1,26 cm (à froid).

Ces crayons et ces tubes guides sont maintenus en place par des grilles en Inconel-718, au nombre de 8 sur la hauteur de l'assemblage, dont 7 sur la partie active du coeur. Le contact crayon combustible-grille s'effectue par l'intermédiaire de languettes-ressorts et pour les tubes guides il fait intervenir, en plus, des manchons en acier SS-304, ceux-ci brasés sur les grilles.

I.1.3 - Description des cellules

a) Cellules combustible

Les crayons de combustible sont constitués de pastilles de dioxyde d'uranium, légèrement enrichi en ^{235}U, groupées dans des tubes de zircaloy. Ils sont pressurisés à l'hélium.

Les caractéristiques des crayons de combustible à froid sont :

. diamètre extérieur de la gaine (cm) -------------- 0,950
. diamètre intérieur de la gaine (cm) -------------- 0,836
. diamètre des pastilles d'UO_2 (cm) ---------------- 0,819
. fraction volumique de l'UO_2 dans les pastilles --- 0,9833
. hauteur active (cm) ----------------------------- 365,8

b) Tubes guides

Les tubes guides sont en zircaloy et jouent plusieurs rôles :

. Ils reçoivent les crayons de poisons consommables ; l'utilisation de poisons consommables permet de réduire la concentration en bore soluble dans le modérateur et assure un coefficient de température du modérateur négatif. Le poison consommable utilisé est du verre de borosilicate contenant 12,5 % en poids de B_2O_3.

Il y a 1072 crayons de poison consommable dans le coeur, répartis comme suit :

- 8 assemblages contiennent 20 crayons (tous appartenant à la région II)
- 48 assemblages contiennent 16 crayons (40 assemblages dans la région II, 8 dans la région III)
- 12 assemblages contiennent 12 crayons (4 assemblages dans la région II, 8 dans la région III).

Les dimensions nominales à froid d'une cellule de poison consommable sont données dans la figure I.2.

La disposition des crayons dans un assemblage est indiquée sur la figure I.3 et la localisation dans le coeur des assemblages contenant les poisons consommables est fournie par la figure I.4.

. Ils permettent le passage des barres de contrôle. Le matériau absorbant de ces barres est un alliage d'argent, d'indium et de cadmium dans les proportions 80, 15 et 5 %. Ces barres sont formées de grappes constituées chacune de 24 crayons. Il y a 48 grappes de contrôle gainées en acier - 304.

Elles sont réparties en 6 groupes de contrôle et d'arrêt comportant chacun 8 grappes. La figure I.5 montre la position des grappes dans le coeur.

. Ils permettent l'installation de tubes d'instrumentation interne dans lesquels peuvent être déplacés des détecteurs mobiles "In core" utilisés pour faire des cartes détaillées de flux.

Les assemblages instrumentés sont au nombre de 50 avec le tube d'instrumentation au centre. Leur localisation est indiquée sur la figure I.6.

. Les tubes guides des assemblages qui n'ont ni grappes de contrôle, ni poisons consommables, sont bouchés dans leur partie supérieure pour éviter de constituer des courts-circuits hydrauliques.

I.1.4 - Description sommaire de la chambre à fission

Principe et mode de fonctionnement [1, 2]

Les résultats expérimentaux, utilisés pour tester notre schéma de calcul, sont délivrés par l'EDF. Ce sont des mesures des taux de réaction de fission par des chambres à fission de type CFUF 43 (figure I.7).

Les chambres à fission sont des détecteurs en ligne dont la partie utile placée dans le coeur au point de mesures, donne directement le signal électrique, lequel est transmis au sous-ensemble de mesures placé hors pile, au moyen d'un câble électrique. Elles sont mobiles et sont retirées du coeur en-dehors des périodes de mesures.

Le fonctionnement de ces chambres est basé sur l'ionisation des gaz (argon sous pression) par les fragments de fission émis par un matériau fissile (uranium enrichi à 93 % en ^{235}U) contenu dans la chambre. Les charges électriques créées dans le gaz sont collectées sur l'électrode-signal et mesurées sous forme de courant.

Le diamètre des chambres est de 4,7 mm. Leur longueur maximale sans câble est de 66 mm et leur longueur sensible est de 27.5 mm.

L'utilisation des chambres est limitée aux mesures dans les trous d'eau. Les assemblages instrumentés dont le tube central contient un canal d'exploration, sont au nombre de 50.

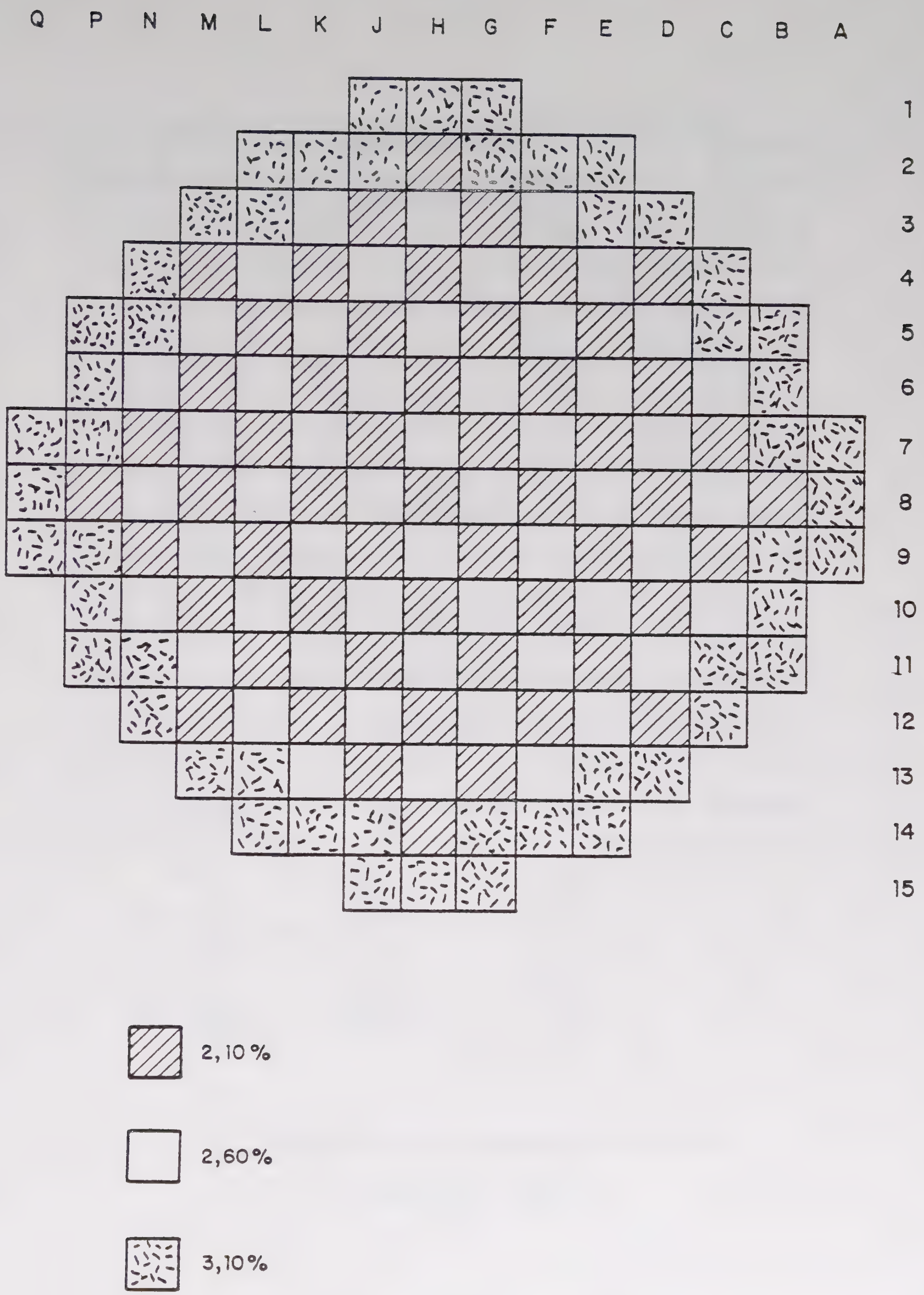
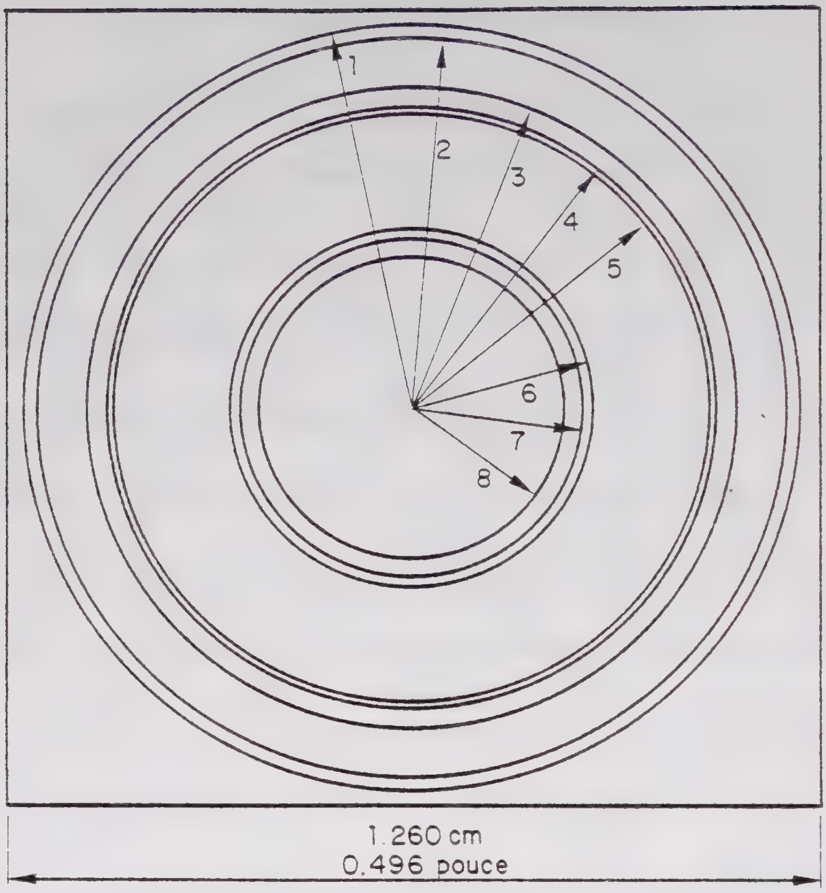


Figure I.1 _ Répartition des enrichissements.



Rayon n°	cm	Pouce	Matériau
1	0,6120	0,2410	Zircaloy
2	0,5715	0,2250	Eau
3	0,4840	0,1905	SS - 304
4	0,4370	0,1720	Hélium
5	0,4265	0,1630	Pyrex
6	0,2415	0,0950	Hélium
7	0,2375	0,0935	SS - 304
8	0,2210	0 0870	Hélium

Figure I.2 _ Dimensions nominales à froid d'une cellule de poison consommable.

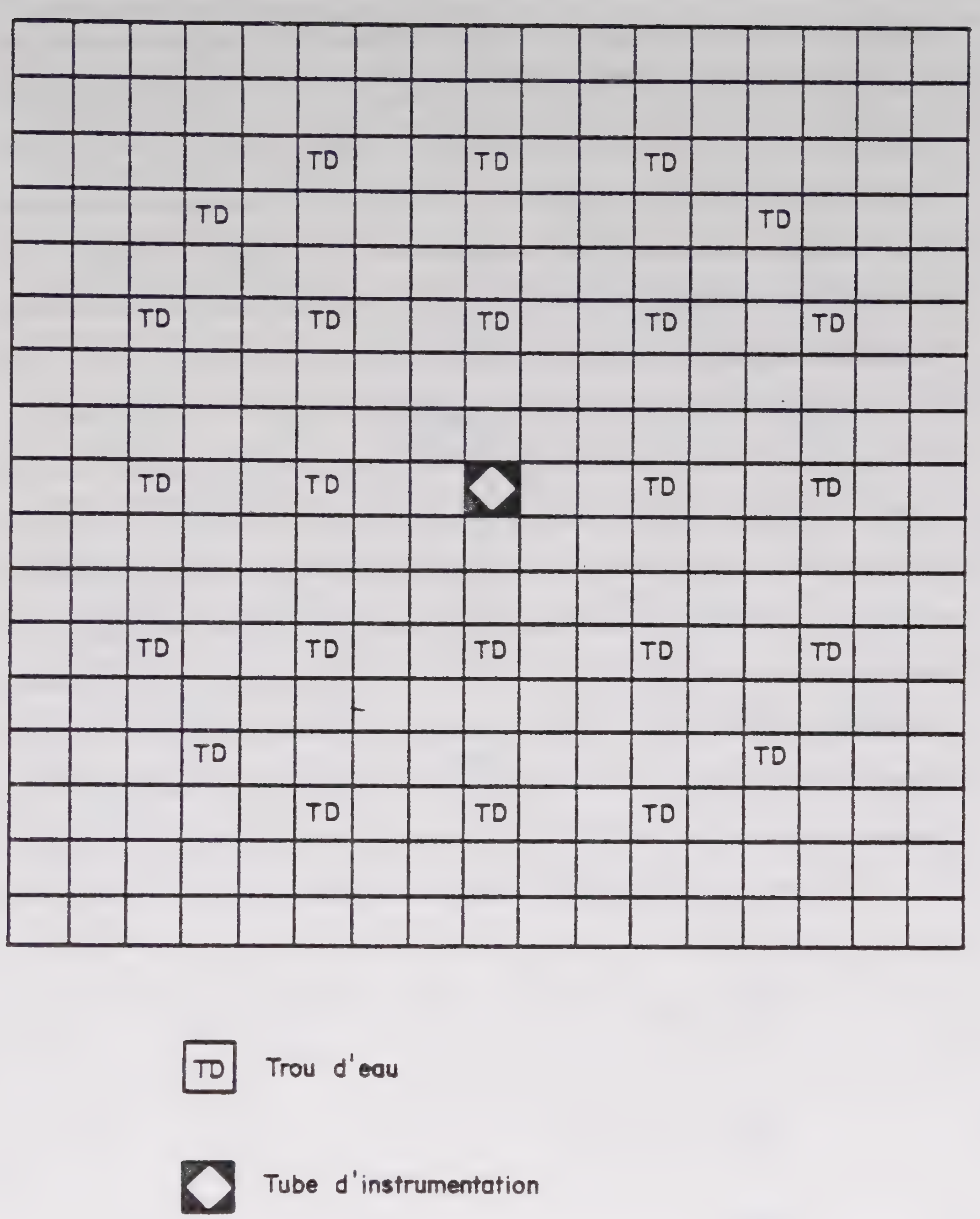


Figure I.3a _ Assemblage sans poison.

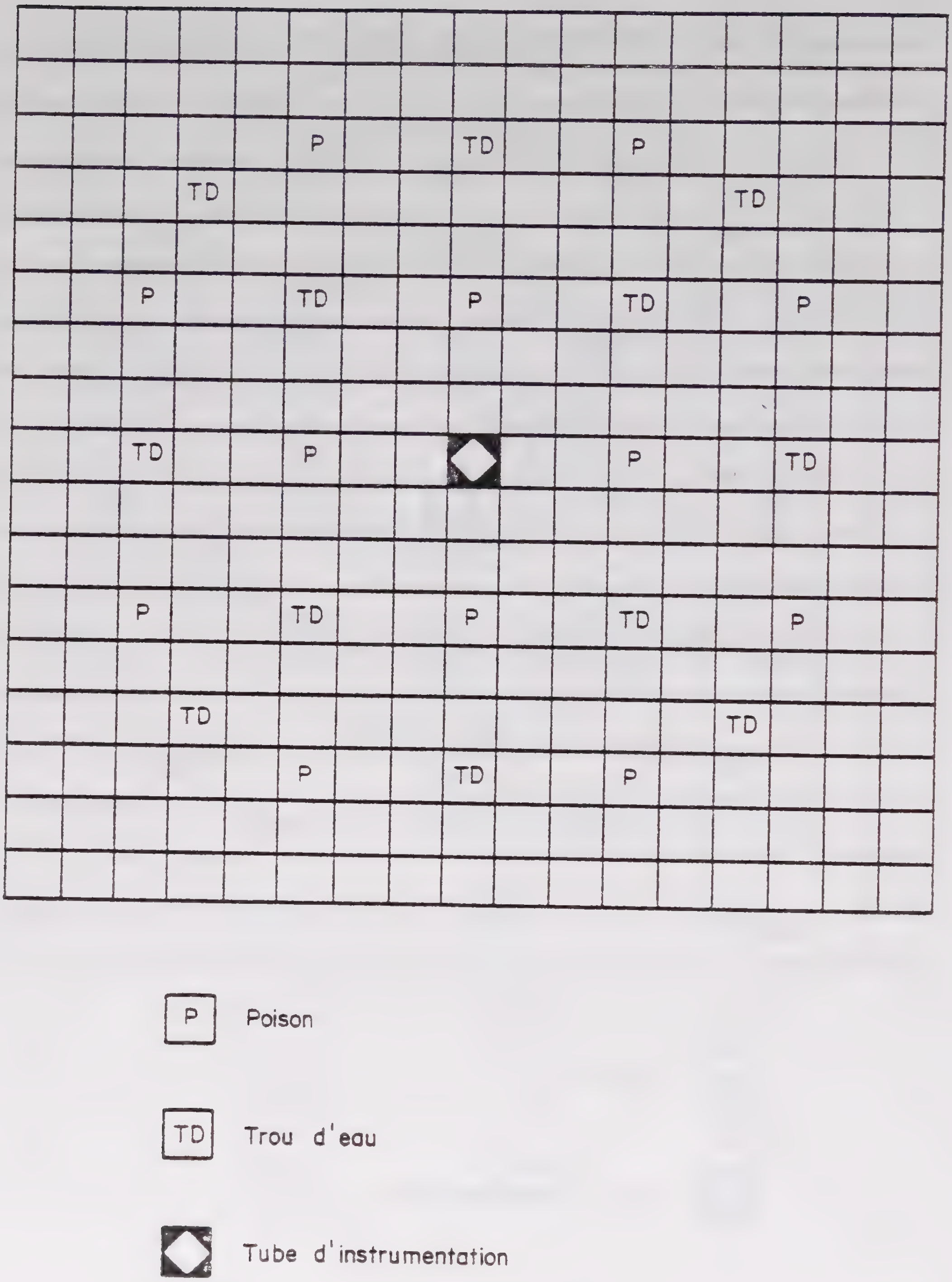


Figure I.3 b _ Assemblage à 12 poisons.

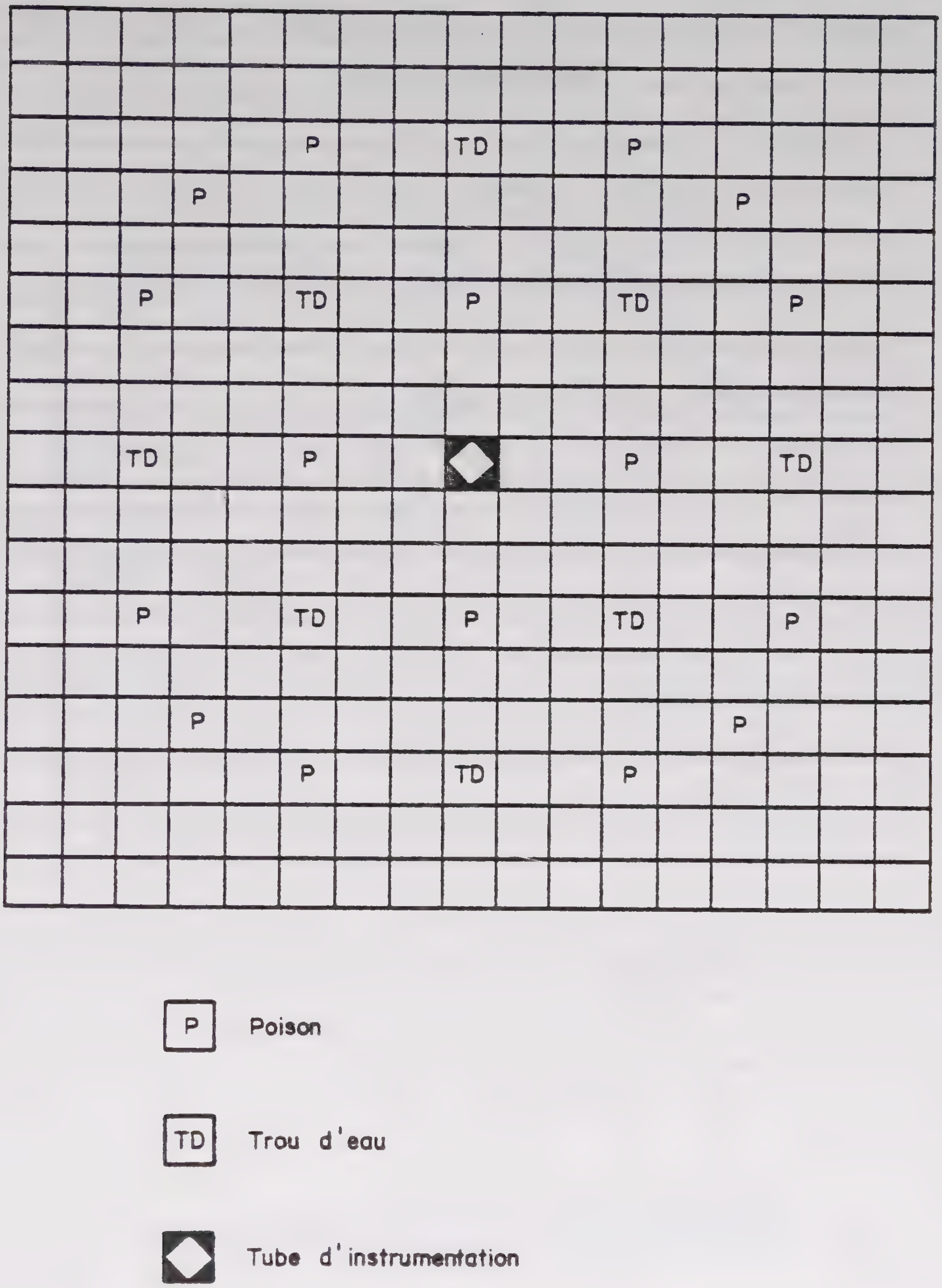


Figure I.3 c _ Assemblage à 16 poisons.

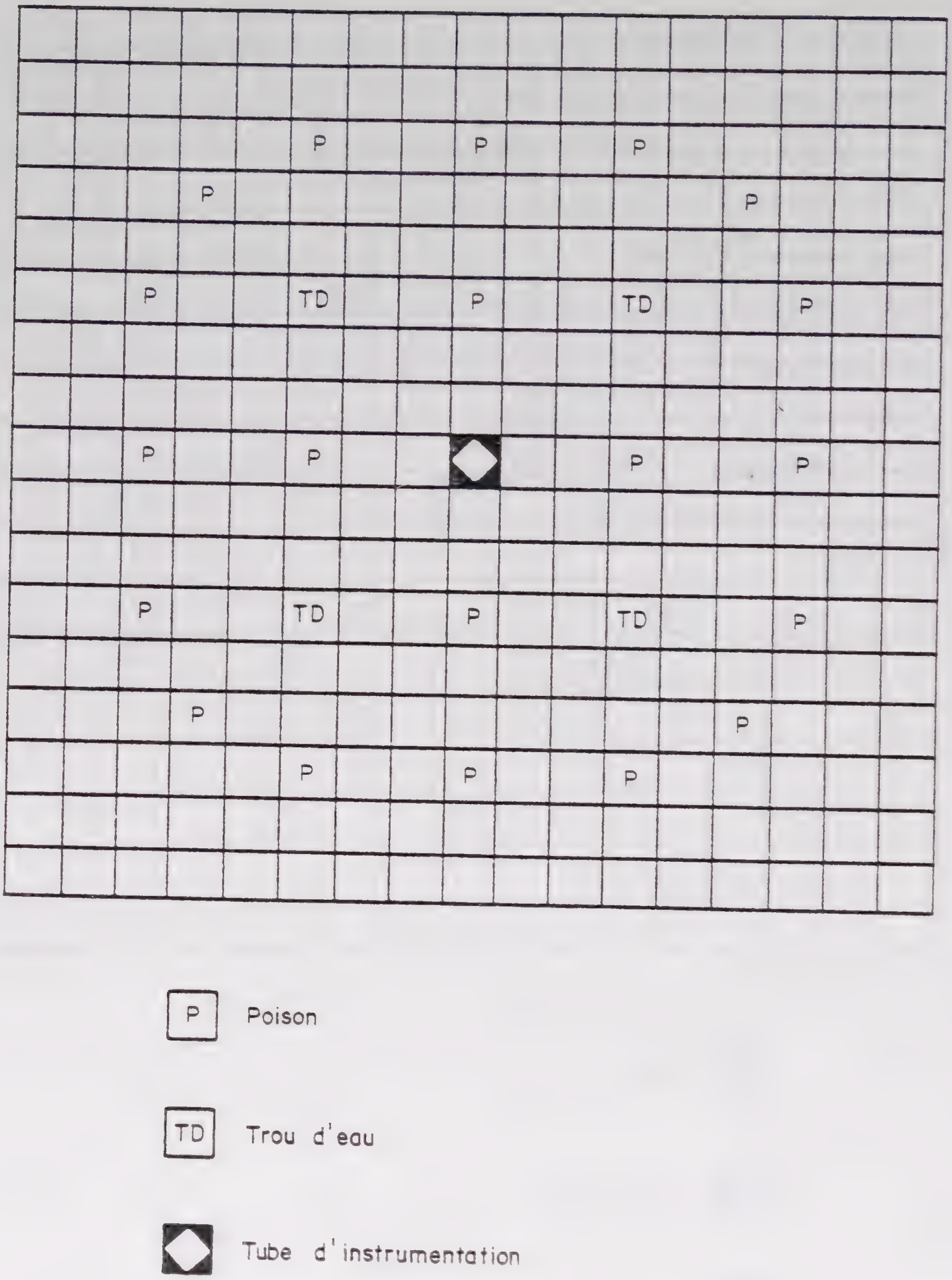
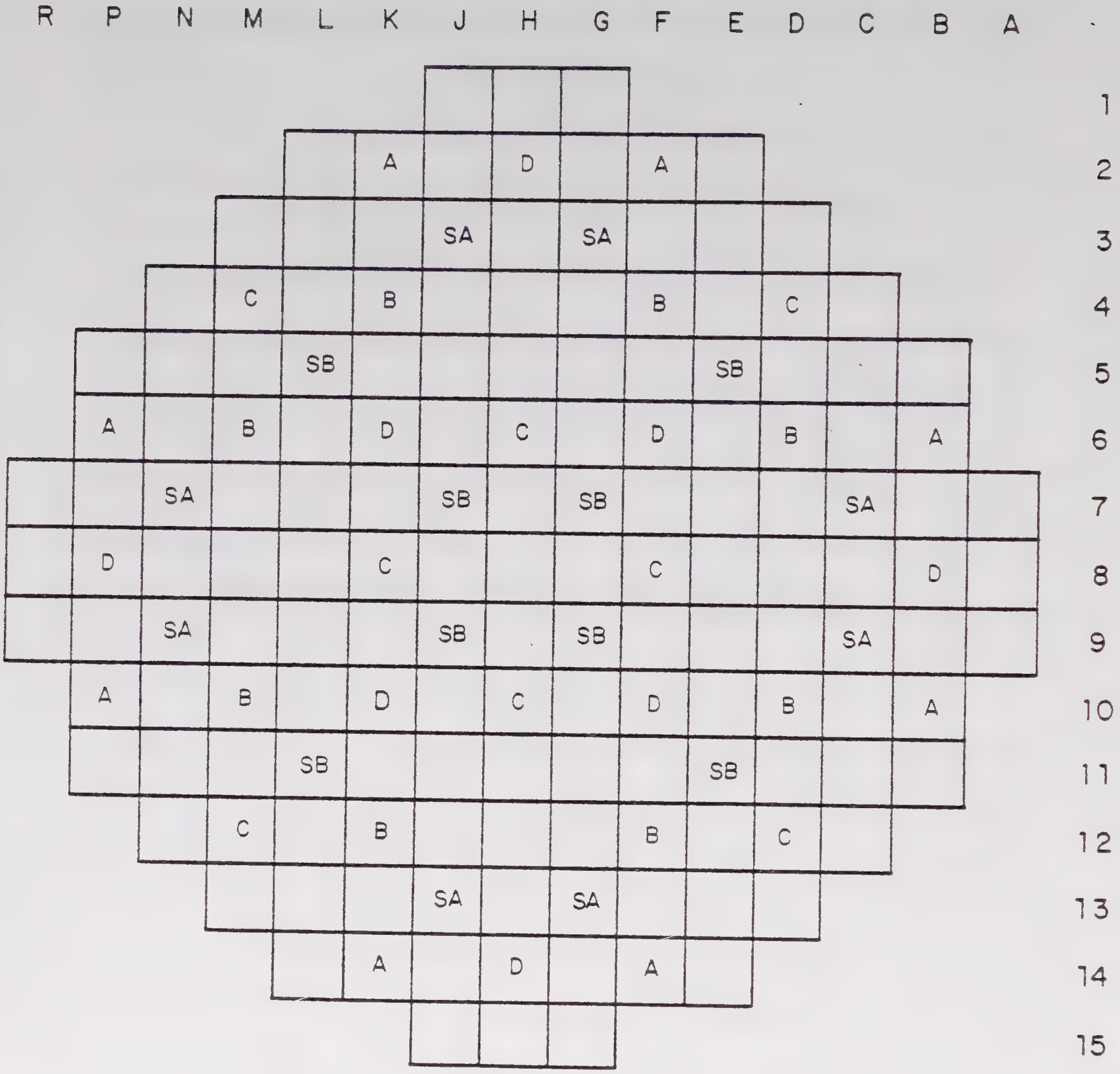


Figure I.3 d _ Assemblage à 20 poisons.

	R	P	N	M	L	K	J	H	G	F	E	D	C	B	A
1															
2							16		16						
3					12	16		12		16	12				
4					16		16		16		16				
5			12	16		16		20		16		16	12		
6			16		16		16		16		16		16		
7		16		16		16		20		16		16		16	
8			12		20		20		20		20		12		
9		16		16		16		20		16		16		16	
10			16		16		16		16		16		16		
11			12	16		16		20		16		16	12		
12					16		16		16		16				
13					12	16		12		16	12				
14							16		16						
15															

Figure I.4 _ Position des poisons consommables dans le coeur.



4 groupes de 8 grappes longues chacun : A - B - C - D

2 groupes de 8 grappes longues chacun : SA - SB

Figure I.5 _ Position des grappes de contrôle et d'arrêt.

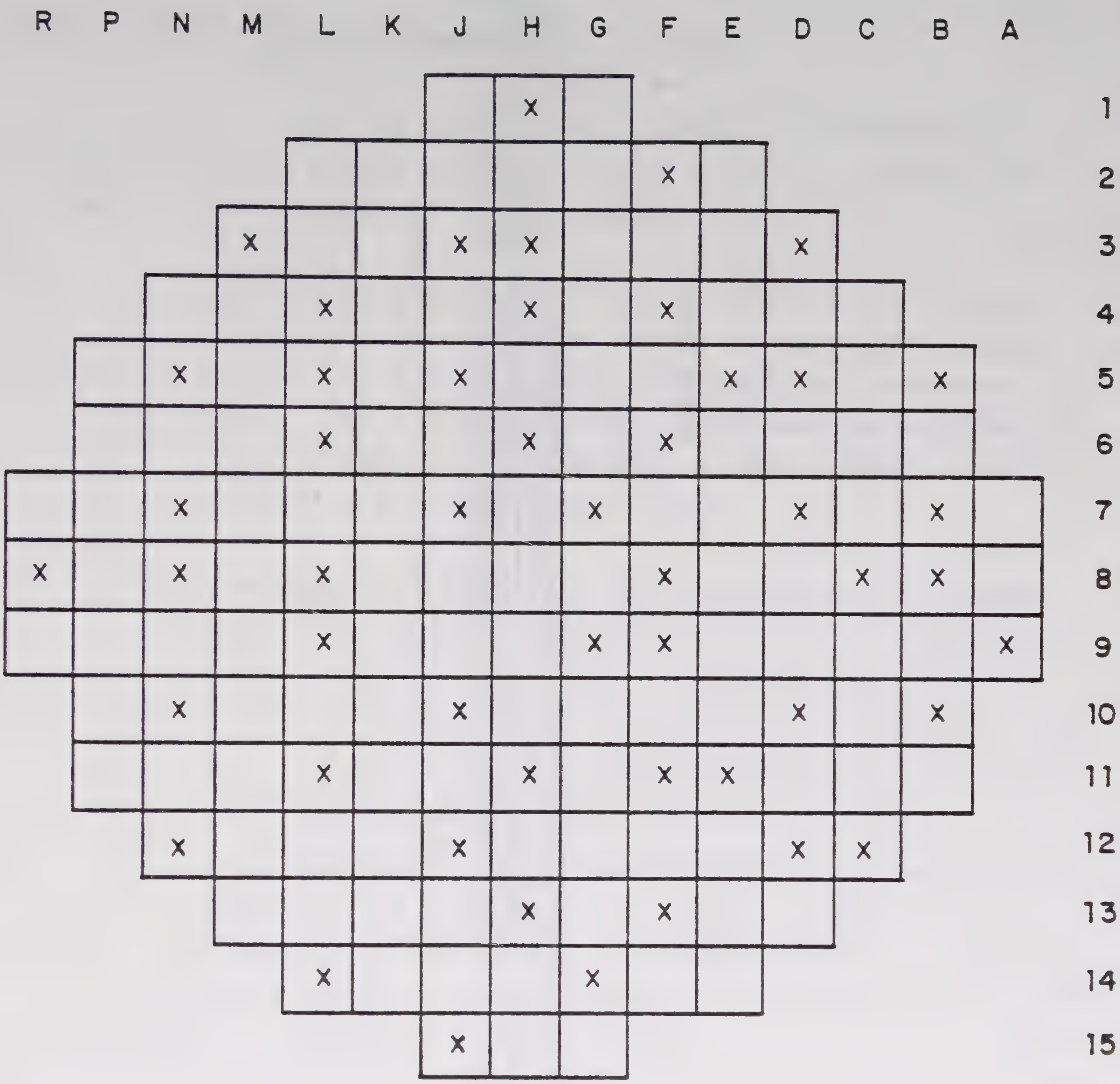


Figure I.6 _ Position des canaux d'instrumentation.

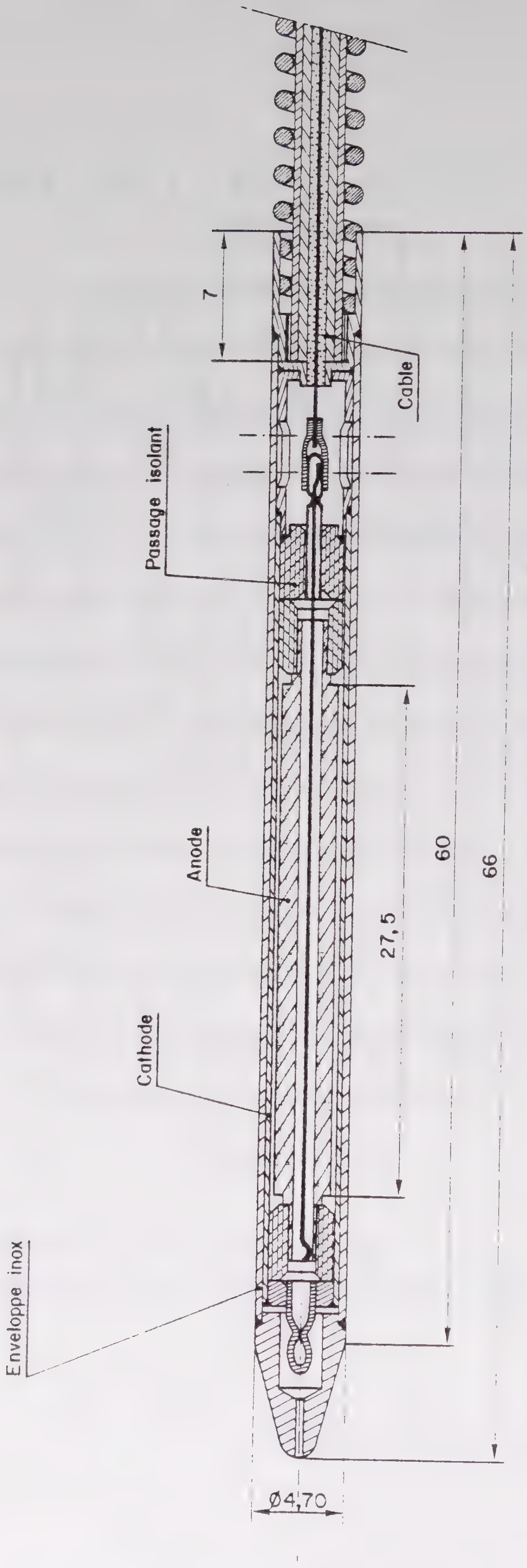


Figure I.7 _ Chambre à fission.

I.2 - PRESENTATION DES CODES - METHODE DE CALCUL

I.2.1 - Présentation générale de la méthode

Pour calculer les paramètres neutroniques d'un réseau dont le motif de base est composé d'une ou plusieurs cellules, la méthode généralement utilisée se décompose en deux étapes :

- La première étape consiste à résoudre l'équation du transport pour calculer la distribution du flux en espace et en énergie, à l'intérieur du motif répétitif à l'infini qui caractérise le réseau, ainsi que les paramètres neutroniques des cellules, qui sont généralement des paramètres intégraux moyennés sur des domaines donnés, d'énergie et d'espace.

- La deuxième étape consiste à traiter tout ou partie du réseau considéré en utilisant généralement un calcul en théorie de la diffusion.

I.2.2 - Calcul de transport

Le calcul de transport est effectué à l'aide du programme APOLLO [3] du système NEPTUNE [4]. Celui-ci résout dans l'approximation multigroupe (usuellement 99 groupes dont 47 thermiques) l'équation du transport à une dimension en géométrie plane, cylindrique ou sphérique, en utilisant la méthode de probabilités de première collision P_{ij} pour le calcul spatial du flux dans chaque groupe. Les probabilités P_{ij} sont fournies par un sous-programme selon la géométrie considérée.

P_{ij} est la probabilité pour un neutron né de manière uniforme et isotrope dans la région i de subir son premier choc dans la région j.

Lorsque le motif de base du réseau est composé de plusieurs types de cellules, APOLLO permet le calcul de ce motif à l'aide de deux modules :

a) Module multicellule

b) Module MARSYAS

a) Module multicellule

Dans ce module on tient compte de l'interaction des spectres des cellules ; on effectue le calcul de probabilité de première collision P_{iIjJ} pour un neutron né dans la région i de la cellule I et subissant son premier choc dans la région j de la cellule J. La méthode employée consiste à engendrer les P_{iIjJ} à partir des P_{ij} précédemment définies pour chaque cellule. Différentes approximations sont disponibles dans APOLLO tant au niveau du calcul de P_{ij} pour chaque cellule, que pour le calcul de couplage entre les différentes cellules pour obtenir les P_{iIjJ}.

a-1) Modules de calcul multicellule dans APOLLO

a) Module NAUSICAA

b) Module CALLIOPE

c) Module multicellule classique fondé sur l'approximation de (ROTH 1), on l'appellera module ROTH.

Dans ces modules certaines approximations ont été faites :

- l'une, pour le flux intégral à l'intérieur de chaque cellule, ce qui permet de construire une matrice locale de probabilité de collision ;

- l'autre, une double approximation sur le comportement spatial et angulaire des courants à la surface de chaque cellule, ce qui permet de définir un couplage entre les cellules et de combiner toutes les matrices locales pour définir une matrice globale pour l'ensemble des cellules.

On présentera un résumé des principes et approximations de chaque module dont les détails sont donnés par les références [5, 6, 7].

Module NAUSICAA

Dans ce module, on a les approximations suivantes :

- L'une pour le flux intégral à l'intérieur de chaque cellule : on décompose chaque cellule en couronnes (pour tenir compte de l'effet radial du flux) et chacune des couronnes en secteurs azimutaux équi-angulaires. (On tient compte de la forme rectangulaire de la surface et par conséquent de l'effet angulaire de gradient de flux). On utilise l'approximation du flux plat dans chaque zone.

Ceci représente un vrai calcul à deux dimensions de probabilité de collision à l'intérieur de la cellule (figure 1a, 1b).

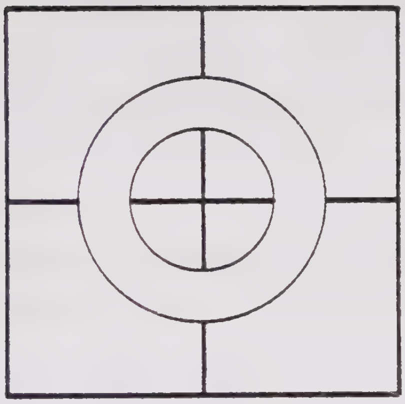


Figure 1a

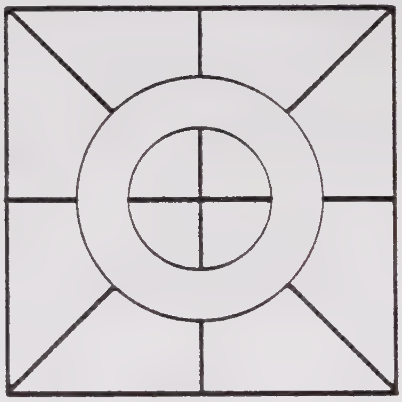


Figure 1b

- L'autre pour le courant à la surface de chaque cellule :

. Approximation du comportement spatial du courant : on suppose que le courant est spatialement uniforme sur chaque côté de la cellule. Le module peut traiter l'uniformité du courant sur toute la surface de la cellule.

. Approximation du comportement angulaire du courant : le courant est anisotrope (on fait un développement en fonction de Legendre (P1) en 3 composants).

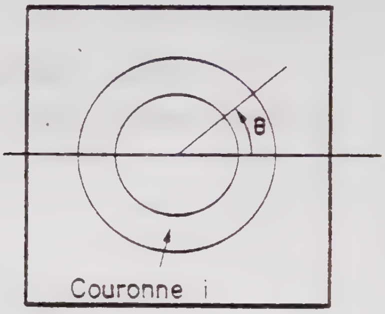
Module CALLIOPE

Dans ce module, on effectue les mêmes approximations pour le comportement spatial et angulaire du courant que dans le module NAUSICAA.

L'approximation faite pour représenter le flux intégral à l'intérieur de la cellule est de la rendre cylindrique et de la décomposer en couronnes homogènes. Pour tenir compte du gradient du flux sur l'ensemble de la cellule, le flux dans une couronne (i) est représenté par une approximation dipolaire

$$\phi_i\ (F) = \sum_{k=0}^{2} \phi_i^k\ (r)\ .\ \psi_i^k$$

$\psi_i^0 = 1,\quad \psi_i^1 = \sqrt{2}\ \sin\theta\quad$ et $\quad\psi_i^2 = \sqrt{2}\ \cos\theta$



θ étant l'angle entre le rayon vecteur r et l'axe horizontal de la cellule.

Le module traite aussi l'approximation du flux plat, en se limitant au premier terme de développement.

Dans ce module la matrice de collision associée à la représentation de ce flux est calculée en faisant des approximations supplémentaires (pour remplacer un calcul à deux dimensions par un calcul à une dimension, en géométrie cylindrique). Cette matrice de collision contient en réalité trois sous-matrices : celle de collision entre les zones, celle de fuite entre zone et surface de la cellule et celle de transmission entre surfaces. Le calcul des matrices de collision et de fuite se fait dans le modèle cylindrisé de la cellule, tandis que le calcul de la matrice de transmission se fait en utilisant un autre modèle appelé "modèles PSS" pour tenir compte de la forme rectangulaire de la cellule et pour distinguer la transmission par les différentes faces de la cellule.

Trois modèles PSS sont disponibles :

- ROTHX4 : les probabilités de transmission se construisent proportionnellement aux surfaces de sortie ;

- HOMOGENE : les probabilités de transmission sont calculées dans la cellule homogène équivalente. Elles sont ensuite normalisées pour avoir la même probabilité de transmission totale que la cellule cylindrisée ;

- HETEROGENE : le calcul se fait dans la vraie géométrie de la cellule.

Pour représenter une cellule rectangulaire dont la longueur des côtés est a et b par une cellule cylindrique de rayon R, trois modèles sont disponibles :

- la cylindrisation classique de WIGNER, où l'on conserve le volume du modérateur, donc :

$$R = \sqrt{ab/\pi}$$

- la cylindrisation d'ASKEW où l'on conserve la surface extérieure de la cellule en diluant le modérateur :

$$R = \frac{1}{\pi} (a + b)$$

- la cylindrisation WIGNER-ASKEW où l'on calcule les matrices de collision et de fuite avec la cylindrisation WIGNER ; mais où on emploie la vraie surface de la cellule dans les relations de conservation qui servent à normaliser les probabilités de transmission.

Module multicellule classique de ROTH

En fait ce module correspond au module CALLIOPE avec les options suivantes :

- Approximation du flux plat dans chaque couronne pour le flux intégral (pas d'approximation dipolaire) ;
- Courant uniforme et isotrope sur toute la surface de la cellule ;
- Cylindrisation de WIGNER.

a-2) Solution du système de la multicellule

En utilisant les approximations du flux intégral et du courant, présentées précédemment, on peut écrire les équations représentant l'ensemble des cellules sous la forme matricielle suivante :

$$\left.\begin{array}{l} \Phi = P_{.s} J_- + PF \\ J_+ = P_{ss} J_- + P_{s.} F \end{array}\right\} \text{ pour chaque cellule}$$

$$J_- = AJ_+ \qquad \text{pour l'ensemble des cellules}$$

où

Φ, J_- et J_+ sont les matrices de flux moyen, courant entrant et courant sortant respectivement

P, $P_{s.}$ et P_{ss} sont les matrices de probabilités de collision, de fuite et de transmission de la cellule ($P_{s.}$ et $P_{.s}$ sont reliées par une relation de réciprocité)

F est la matrice de la densité d'émission

A est baptisée "matrice géométrique". Elle représente le couplage de l'ensemble de la multicellule.

En éliminant successivement les courants dans le système d'équations, on obtient une matrice approchée de probabilités de collision pour l'ensemble de la multicellule,

$$\Phi = \tilde{P}F$$

$$\text{avec} \quad \tilde{P} = P + P_{.s} \, P_{ss} \, P_{s.}$$

$$\text{et} \quad P_{ss} = XA$$

$$X = (I - AP_{ss})^{-1}$$

Si I et J sont respectivement les cellules contenant les zones i et j, alors la probabilité de collision P_{iIjJ} est donnée par :

$$P_{iI,jJ} = \delta_{IJ} \cdot P^{+}_{ij} + P^{I}_{is} \; P_{SI \rightarrow SJ} \; P^{J}_{Sj} \qquad (1)$$

où

$$\delta_{IJ} = \begin{cases} 0 & \text{Si } I \neq J \\ 1 & \text{Si } I = J \end{cases}$$

P^{+}_{ij} est la probabilité de premier choc sans sortie de la cellule I.

$P^{I}_{is} = 1 - \sum_{j \,\varepsilon I} P^{+I}_{ij}$ est la probabilité de sortie sans choc de la cellule I pour un neutron né en i.

$P_{SI \rightarrow SJ}$ est la probabilité pour un neutron sortant de la cellule I d'atteindre la cellule J.

P^{J}_{sj} est la probabilité pour un neutron entrant dans J d'avoir son premier choc en j.

L'équation (1) est la base de toutes les approximations du type multicellule. L'inconvénient de cette approximation est dû au fait que les neutrons oublient leur origine une fois qu'ils ont traversé la surface extérieure de la cellule.

Dans le module de ROTH les P^{+}_{ij} et les P^{J}_{sj} sont calculés par le code ALCOLL [8].

Dans ce cas on peut calculer les $P_{SI \rightarrow SJ}$ qui sont la seule approximation de l'expression (1). Si S_{IJ} est la probabilité pour un neutron sortant pour la première fois de I d'entrer dans la cellule J qui a une frontière commune avec I, alors ces S_{IJ} sont des rapports de surface :

$$S_{IJ} = \frac{\text{Surface de I en contact avec J}}{\text{Surface totale de I}}$$

S_{IJ} est déterminé par l'examen du réseau à deux dimensions.

Le calcul des $P_{SI \rightarrow SJ}$ s'effectue simplement :

$$P_{SI \rightarrow SJ} = S_{IJ} + \sum_{K} S_{IK} \, T_K \, P_{SK \rightarrow SJ} \qquad (2)$$

où

T_K est la probabilité de traverser la cellule K sans subir de choc (calculable à partir d'ALCOLL).

Ce système d'équation (2) donne les $P_{SI \rightarrow SJ}$.

b) Module MARSYAS [8]

Dans ce module le motif de base représenté par un ensemble de cellules peut être traité entièrement par une méthode exacte de calcul des probabilité de collision ; l'approximation obligatoire (1) dans tous les modules de traitement de multicellule est donc évitée.

Le motif de base est divisé en N régions, la division en cellules n'est plus nécessaire. Donc, les approximations concernant la représentation du courant à la surface de chaque cellule n'auront pas lieu.

Cette méthode de calcul peut être considérée comme une méthode de référence, mais elle nécessite le calcul de N x N probabilités de collision et le coût de calcul devient alors très élevé.

Conclusion

Pour le calcul de transport, on a donc deux modes de calcul des probabilités de collision :

- Un calcul direct entre zones ; c'est le principe du calcul MARSYAS où le parcours exact du neutron est respecté. Ce module offre des résultats de référence, mais le calcul est trop onéreux pour des études de projets.

- . Un autre calcul basé sur un formalisme multicellule où les neutrons oublient leur origine une fois qu'ils ont traversé la surface extérieure de la cellule ; il est utilisé dans les modules NAUSICAA, CALLIOPE et ROTH.

. Dans le premier module, NAUSICAA, les probabilités de collision à l'intérieur de chaque cellule sont calculées exactement à 2D ; ce qui permet d'obtenir dans le cas d'une géométrie 2D, et pour des cellules rectangulaires ou carrées, une solution approchée de l'équation de transport.

. Dans le module CALLIOPE les probabilites de collision à l'intérieur de chaque cellule sont calculées en cylindrisant la cellule, ce qui permet des calculs moins onéreux et toutefois moins précis que NAUSICAA.

. Le module de ROTH permet d'obtenir une solution à une dimension à l'intérieur de chaque cellule.

. Dans le cas de fortes hétérogénéités (barres de contrôle ou poison consommable), les hypothèses ramenant les calculs à une dimension d'espace sur lesquelles est fondée la méthode de ROTH, peuvent conduire à des erreurs non négligeables sur les rapports de flux et donc sur les taux de réaction entre les diverses cellules.

. Des études [10,11] ont été faites sur l'assemblages de type PWR contenant du pyrex comme poison consommable. Ces études ont montré que le modèle de ROTH se révèle suffisant ; il reste une approximation globalement correcte, et la représentation d'un tel assemblage est plutôt un problème d'individualisation des cellules qu'une question d'amélioration du calcul des hétérogénéités.

Ces résultats nous ont conduit à choisir le module multicellule classique de ROTH du code APOLLO pour notre calcul de transport.

I.2.3 - Calcul de diffusion

Le calcul de transport précédemment défini permet d'obtenir les différents paramètres neutroniques qui sont généralement des paramètres intégraux moyennés sur des domaines donnés, d'énergie et d'espace. Ces paramètres sont nécessaires pour traiter le réseau en utilisant un calcul en théorie de la diffusion.

Les principaux modules pour le calcul de diffusion :

Deux modules sont disponibles pour les calculs dè diffusion.

a) Le module de diffusion aux différences finies [4] :

Ce module, nommé DIANE, existe pour le traitement détaillé des géométries à deux dimensions. Le calcul est effectué en utilisant les paramètres neutroniques moyens des milieux homogènes équivalents à chaque type de cellule.

Le calcul DIANE comme un calcul fin de diffusion est adapté aux traitements détaillés du réseau. L'inaptitude de la théorie de diffusion à calculer correctement la distribution spatiale des taux de réaction au voisinage des hétérogénéités que représentent les poisons consommables, a conduit à établir une équivalence complémentaire [12] entre le calcul de diffusion et le calcul de transport. On a établi cette équivalence en utilisant le programme EQUIPAGE, dans lequel il y a une correction fondée sur le conservation des taux de réactions fournies par le calcul de transport initial.

b) Le module de diffusion aux éléments finis

La méthode des éléments finis [13] appliquée à la résolution de l'équation de diffusion, permet de réduire le nombre des inconnues par rapport à la méthode des différences finies, si l'on prend des éléments de grandes tailles. Elle est donc particulièrement adaptée aux traitements macroscopiques du réseau.

Trois modules sont disponibles :

- Module BILAN qui traite les problèmes à deux dimensions avec un maillage XY d'éléments rectangulaires quelconques ; sur chaque élément le flux peut être représenté par des polynômes de degré 1, 2 ou 3 en X et en Y.

- Module TRIDENT qui traite les problèmes à trois dimensions avec un maillage d'éléments parallélépipédiques rectangles quelconques : les polynômes d'approximation peuvent être linéaires ou paraboliques en z.

Les deux modules traitent les conditions aux limites de flux nul et de courant nul, la condition d'extrapolation ainsi que les invariances par rotation π et $\pi/2$ et la symétrie diagonale. Ils permettent les calculs d'évolution, la détermination de concentrations à saturation ou en transitoire (xénon, samarium) ou de concentration critique (bore par exemple).

- Module CRONOS [14, 15] qui permet de tenir compte de l'effet de contre-réactions (effet Doppler et effet de densité du modérateur) par un couplage entre BILAN (ou TRIDENT) et FLICA III [16] qui traitent respectivement la neutronique et la thermohydraulique.

CHAPITRE II

CALCUL D'UNE CARTE D'ACTIVITE SUR LE COEUR NEUF

ETUDE DE SENSIBILITE ET CHOIX D'UN SCHEMA DE REPRESENTATION

INTRODUCTION

Dans ce chapitre on présente le schéma de calcul utilisé pour effectuer le calcul du coeur sans évolution afin d'obtenir une carte théorique des activités.

Le choix d'un schéma de calcul dépend d'une part de la précision voulue pour les résultats, d'autre part, du coût de calcul à mettre en oeuvre.

L'objectif de ce chapitre est donc une présentation de résultats permettant le choix d'un schéma optimum de calcul utilisable aussi bien en début de vie (step zéro) qu'au cours de l'évolution du cycle 1 du réacteur, tout en respectant les indicateurs expérimentaux (mesures d'activités des chambres de fission).

Comme nous l'avons exposé précédemment au chapitre I, le calcul du coeur s'effectue en deux étapes :

1 - La première consiste en un calcul d'assemblage en théorie de transport en utilisant l'option multicellule ROTH du programme APOLLO.

2 - La seconde étape est le calcul du coeur en utilisant le programme BILAN ou le programme DIANE.

Différents problèmes ont été traités ; soit au niveau du calcul de transport (lame d'eau et prise en compte des chambres de fission) ; soit au niveau du calcul du coeur (influence du maillage et du degré du polynôme d'interpolation sur les distributions de puissance intégrées et les distributions locales de flux).

Ensuite, nous avons étudié la sensibilité des distributions de puissance et d'activités dans le coeur en fonction de deux paramètres :

- Prise en compte des variations du spectre dans les assemblages périphériques, lors du calcul des constantes homogènes de ces assemblages.

- Constantes de réflecteur.

II.1 - CALCUL DE TRANSPORT

La description des assemblages au niveau du calcul de transport nécessite l'étude de trois aspects :

1 - Effet de la lame d'eau entre assemblages.
2 - Représentation des chambres de fission.
3 - Description des configurations multicellules.

II.1.1 - Effet de la lame d'eau entre assemblages

La lame d'eau est l'espace de faible épaisseur (1 mm) situé entre les assemblages dans le coeur. Un calcul-test a été effectué sur l'assemblage enrichi à 2,1 % afin d'obtenir, d'une part une méthode de représentation correcte de la lame d'eau, d'autre part de déterminer l'influence de cette même lame d'eau sur la réactivité de l'assemblage lors du calcul de transport.

a) Représentation de la lame d'eau

Deux méthodes de représentation ont été testées :

- Méthode 1 : le volume total de la lame d'eau est réparti uniformément sur les 64 cellules périphériques, auxquelles on attribue des dimensions plus grandes respectant ainsi le volume total (lame d'eau + cellules périphériques).

- Méthode 2 : distinguer des cellules supplémentaires représentant la lame d'eau, en périphérie des cellules combustibles adjacentes.

b) Résultats

Le tableau (II.1) représente l'effet de la lame d'eau sur la valeur de K_{inf} pour les deux méthodes précédemment citées.

On notera que la prise en compte de la lame d'eau entre assemblages diminue la valeur du flux microscopique(*) dans la cellule centrale (- 1 %), et par conséquent, la description de la lame d'eau lors du calcul multi-cellule de transport, aura une influence sur le calcul de l'activité(**).

c) Conclusion

On constate que les deux méthodes montrent un effet non négligeable de la lame d'eau tant au niveau du calcul de la réactivité effet de - 119 pcm), qu'au niveau du calcul de flux dans la cellule centrale (effet de - 1 % sur le flux microscopique). Il est donc nécessaire de tenir compte de cet effet.

Les résultats de calculs des deux méthodes étant très proches, le choix se portera sur le prémier mode de représentation de la lame d'eau pour des raisons pratiques : on conservera ainsi les proportions des différents types de cellules dans le calcul multicellule de l'assemblage avec lame d'eau par rapport au calcul de l'assemblage sans lame d'eau.

Ayant fait ce choix nous avons calculé l'effet de la lame d'eau sur les valeurs de K_{inf} pour les autres types d'assemblages dans le coeur (enrichis à 3,1 % et 2,6 % avec et sans poison consommable). Les résultats sont contenus dans le tableau (II.2). On remarquera l'influence de l'enrichissement et du nombre de crayons de poison sur l'effet dû à la lame d'eau.

(*) Rapport entre le flux moyen dans la cellule centrale et le flux moyen dans l'assemblage.

(**) Taux de réaction de fission de l'^{235}U dans la chambre de fission.

II.1.2 - Présentation de la chambre à fission

Dans la réalité les chambres de fission sont mobiles et ne sont présentes dans le coeur qu'au moment de la mesure d'activité. Pour mesurer les activités des cinquante assemblages instrumentés dans le coeur, on fait une série de mesures, chaque mesure ne concernant que cinq assemblages instrumentés à la fois.

Les activités sont calculées à partir

- du flux au centre de chaque assemblage instrumenté, fourni par un calcul de coeur,
- de la section efficace de fission de l'^{235}U dans la chambre de fission placée dans la cellule centrale de l'assemblage.

Pour des raisons de coût de calculs on ne peut simuler entièrement cette série de mesures pour un gain de précision a priori faible.

De ce fait, nous sommes conduits à adopter un double artifice de calcul, qui consiste à effectuer les calculs d'activités en instrumentant tous les assemblages dans le coeur, et ce, pour chaque step d'évolution.

Cette hypothèse de calcul ne représente évidemment pas la réalité physique de notre réacteur et soulève deux problèmes : dans le cas où l'assemblage est instrumenté (50 assemblages sur 157), la chambre de fission n'est présente que momentanément dans le coeur et non pendant toute la durée du cycle. D'autre part, le calcul multicellule des constantes de l'assemblage est rendu plus complexe car nous sommes obligés de différencier la cellule trou d'eau centrale (forte hétérogénéité) et les cellules tampons associées du fait de la présence de la chambre de fission.

Pour ces motifs nous avons fait une étude nous permettant de déterminer la perturbation de flux microscopique dans la cellule centrale due à la présence de la chambre de fission et en même temps nous avons cherché la possibilité de remplacer cette chambre par un simple apport de noyaux de l'^{235}U afin de pouvoir calculer les activités.

a) Effet de la chambre à fission

1 - Pour déterminer l'effet dû à la présence de la chambre de fission, deux calculs APOLLO ont été effectués sur chaque assemblage :

- l'un avec la chambre de fission placée dans la cellule centrale, (ce calcul APOLLO sera nommé APF),
- l'autre sans la chambre de fission, mais en conservant le même nombre de noyaux de l'^{235}U (que celui contenu dans la chambre de fission) dans la cellule centrale, (ce calcul APOLLO sera nommé APU).

2 - Soient

ψ le flux microscopique dans la cellule centrale de chaque assemblage ; ψ_F et ψ_U dans les deux cas de calcul (APF) et (APU).

R le rapport entre le flux microscopique ψ_i d'un assemblage i et le flux microscopique ψ_j d'un assemblage j voisin. L'assemblage enrichi à 2,1 % étant le type d'assemblage le plus représenté dans le coeur, le rapport R précédent est le rapport entre les différents flux microscopiques ψ_i des différents assemblages i et le flux microscopique ψ de l'assemblage enrichi à 2,1 %. R_F et R_U dans les deux calculs (APF) et (APU).

On a cherché la variation du rapport R entre les deux cas de calcul avec et sans chambre de fission, autrement dit l'écart entre R_F et R_U pour chaque assemblage.

Cet écart représente l'effet de la chambre de fission sur la variation de la valeur du flux microscopique dans la cellule centrale et par conséquent l'influence de la chambre de fission sur le calcul d'activité.

b) Résultats et conclusion

Les valeurs des flux microscopiques ψ_F et ψ_U, des rapports entre flux R_F et R_U, ainsi que les écarts entre R_F et R_U pour chaque assemblage sont donnés dans le tableau (II.3).

On notera que ces écarts varient entre 1 et 2 %.

Nous remarquons un effet non négligeable de la chambre de fission d'où la nécessité de la prendre en compte pour calculer correctement les activités ; ce qui nous a conduit à effectuer le calcul du coeur, sans représenter la chambre de fission à partir des calculs APOLLO (APU) des assemblages et à calculer les activités en tenant compte de la perturbation du flux microscopique due à la présence de cette chambre. Cette perturbation est évaluée à l'aide de calculs supplémentaires d'assemblage en théorie de transport dans lesquels la chambre de fission est présente (calcul APF). Lors de la présentation des résultats de calcul du coeur, nous verrons l'influence sur le calcul des activités de la prise en compte de l'effet dû à la présence de la chambre de fission.

II.1.3 - Description des configurations multicellules

Dans le module multicellule ROTH que l'on est amené à utiliser, il devient impossible du fait du coût de calcul associé au grand nombre de points de calcul, de différencier toutes les cellules de la géométrie, (compte tenu des symétries des assemblages et du fait qu'ils sont de type 17x17, il faudrait donc distinguer 45 cellules pour un huitième d'assemblage).

Il s'agit donc de choisir une représentation des assemblages la plus simple possible qui permette d'éviter les erreurs les plus importantes dues aux différences de bilan-matière et aux différents spectres ; ainsi les cellules qui ont le même bilan-matière, le même spectre et des niveaux de flux voisins (exemple des cellules combustibles "asymptotiques" ou "tampons") seront représentées par une seule cellule.

Nous différencions donc :

a - Les trois hétérogénéités :

. Cellule tube d'instrumentation (*)
. Cellule trou d'eau
. Cellule poison consommable.

(*) En cas de présentation de la chambre de fission (calcul APOLLO, APF).

b - Les cellules de combustibles périphériques qui servent à intégrer la demi-lame d'eau inter-assemblages.

c - La "zone tampon" des hétérogénéités qui se compose de :

. Un type de cellule pour les quatre cellules de combustible qui ont un côté commun avec l'hétérogénéité.

. Un autre type de cellule pour le combustible d'angle.

Cette représentation de la zone tampon à 2 types de cellule a été nécessaire [17] car le fait de simplifier la représentation des cellules au voisinage de l'hétérogénéité entraîne une augmentation de l'efficacité du poison, ainsi qu'une diminution du niveau de flux dans l'hétérogénéité trous d'eau.

On obtient ainsi des calculs à 8 ou 11 types de cellules pour les assemblages à poison et des calculs à 5 ou 8 types de cellules pour les assemblages sans poison dans les deux calculs APOLLO (APF, APU).

La figure II.1 montre les différentes représentations dans les cas suivants :

- Un assemblage avec 25 trous d'eau.
- Un assemblage avec 9 trous d'eau et 16 poisons consommables.
- Un assemblage avec 8 trous d'eau, 16 poisons consommables et 1 tube d'instrumentation (cas avec la chambre de fission).

II.1.4 - Mise en oeuvre d'APOLLO

Le calcul APOLLO préliminaire de la géométrie hétérogène réelle est réalisé avec l'option multicellule ROTH.

Les bibliothèques de sections efficaces utilisées sont à 99 groupes, dont 52 rapides et correspondant aux jeux recommandés par le Département des Réacteurs à Eau [18] avec les ajustements proposés par P. Reuss relatifs aux sections de fission, production et de capture de l'^{235}U et à la section de l'absorption de l'^{238}U.

Le calcul de l'autoprotection des corps résonants ^{235}U et ^{238}U est effectué par BIEFF à partir du calcul de la section équivalente (SEQUI) et de la détermination par JEZABEL du facteur de BELL.

Dans le calcul des flux, l'anisotropie du choc est prise en compte par une correction de transport. Les coefficients de diffusion sont calculés en milieu homogénéisé dans l'approximation B1. Les fuites sont simulées par un laplacien critique.

Dans les cellules de combustible, un seul milieu homogénéisé en volume représente la succession du vide, de la gaine zircaloy. Chaque milieu (UO_2, "gaine", modérateur) décrit dans APOLLO ne contient qu'un point de calcul. Dans les cellules de poison, le crayon absorbant est décrit par deux points et enfin le trou d'eau contient trois points de calcul : l'eau intérieure, le tube-guide et l'eau extérieure.

La densité du modérateur est celle de l'eau à 286°C (température du réfrigérant à chaud, puissance nulle), la concentration critique en bore est 1330 ppm (donnée expérimentale).

Les valeurs de K_{inf} sont données au tableau (II.4). On remarque l'effet de la représentation de la chambre de fission dans le calcul sur les valeurs de K_{inf} (effet presque régulier de 100 pcm).

II.1.5 - Constantes pour le calcul de diffusion

Le code APOLLO nous permet l'obtention des différents paramètres neutroniques de l'assemblage nécessaires au traitement du coeur en théorie de la diffusion.

APOLLO dispose de deux modules spécialisés :

- Module SORTEV : il permet la création d'interfaces NEPLIB pour le code DIANE du système NEPTUNE nécessaire au calcul du réacteur. DIANE résout l'équation de la diffusion en se basant sur la méthode des différences finies.

- Module SORTUNE : il crée l'interface NEPLIB, ensemble de données du code ELECTRE faisant aussi partie du système NEPTUNE. Ce code ELECTRE est basé sur la méthode des éléments finis pour résoudre l'équation de la diffusion lors du calcul du réacteur.

Les sorties sont faites :

- soit sur 2 macrogroupes limités par les énergies

10 MeV, 0.625 eV

dans le cas du module SORTUNE,

- sur les mêmes macrogroupes ou sur 4 macrogroupes limités par les énergies

10 MeV, 907 KeV, 5 KeV, 0.625 eV

pour le cas du module SORTEV.

C'est ce dernier découpage à quatre groupes qui a été utilisé dans DIANE.

	K_{inf}
Calcul sans la lame d'eau	1.04149
Calcul avec la lame d'eau (1)	1.04025 (-119 pcm)(*)
Calcul avec la lame d'eau (2)	1.04019 (-125 pcm)

Tableau II.1 _ Effet de la lame d'eau sur la valeur de K_{inf}.

Assemblage	K_{inf} Cas sans LM	K_{inf} Cas avec LM
2.1 %	1.04149	1.04025 (-119)*
3.1 %	1.16741	1.16695 (-39)
2.6 %, 12PC	1.00649	1.00664 (14)
3.1 %, 12PC	1.06419	1.06464 (43)
2.6 %, 16PC	0.97537	0.97590 (55)
3.1 %, 16PC	1.03359	1.03442 (80)
2.6 %, 20PC	0.94425	0.94503 (83)

Tableau II. 2 _ Effet de la lame d'eau sur la valeur de K_{inf}.

* Ecart en pcm par rapport au cas sans la lame d'eau.

Type d'assemblage	Ψ_F	R_F	Ψ_U	R_U	Ecart $\left[\frac{R_U}{R_F} - 1\right] \times 100$
2.1%	1.0169	—	1.1252	—	—
3.1%	1.0404	1.023	1.1635	1.034	1.1
2.6%, 12 pc	1.0632	1.046	1.1915	1.059	1.2
3.1%, 12 pc	1.0765	1.059	1.2125	1.078	1.8
2.6%, 16 pc	1.0902	1.072	1.2234	1.087	1.4
3.1%, 16 pc	1.1040	1.086	1.2453	1.107	1.9
2.6%, 20 pc	1.1247	1.106	1.2636	1.123	1.5

Tableau II.3 _ Effet de la chambre de fission sur la valeur du flux microscopique.

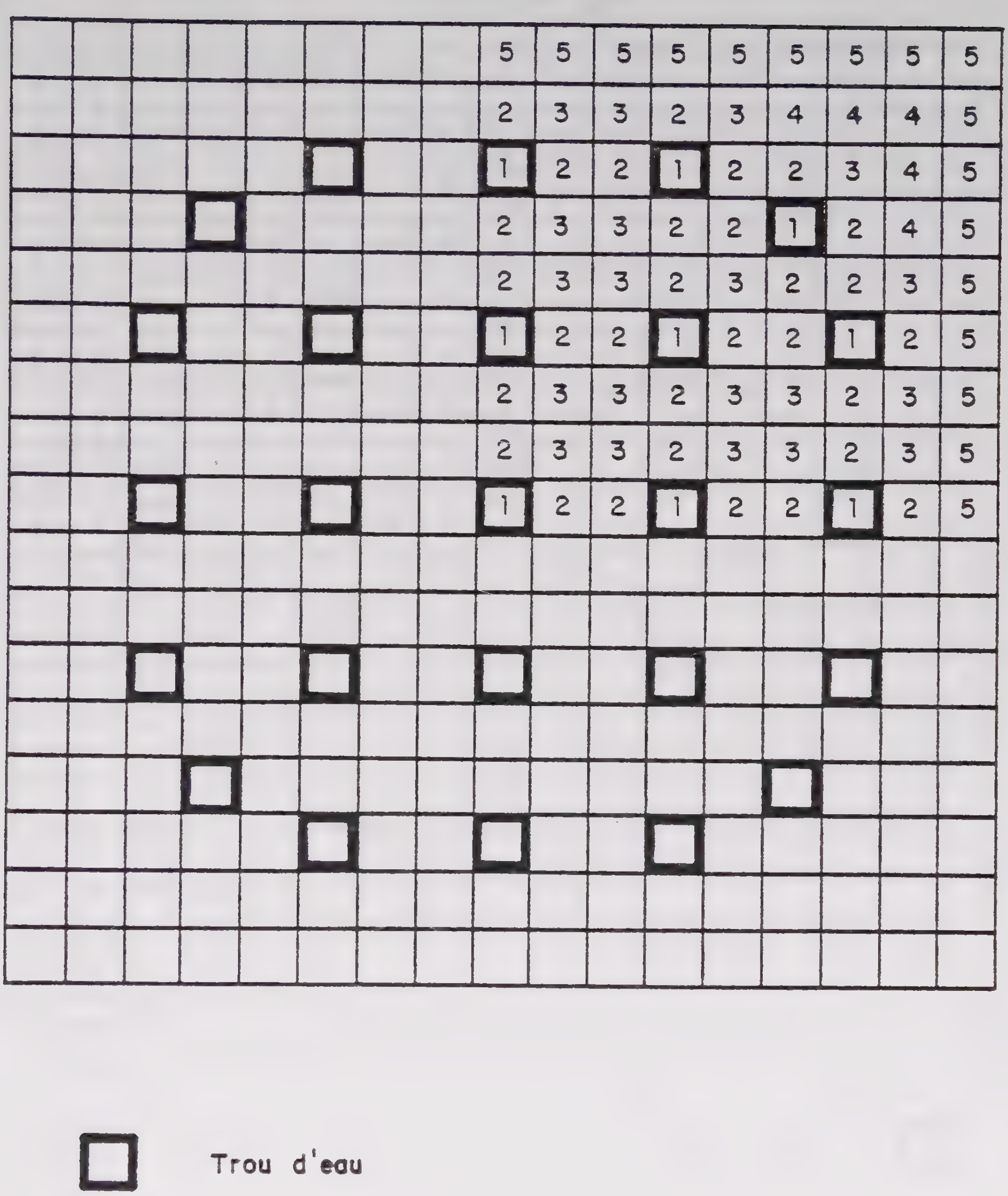


Figure II. 1. a _ Représentation multicellule dans l'assemblage sans poison.

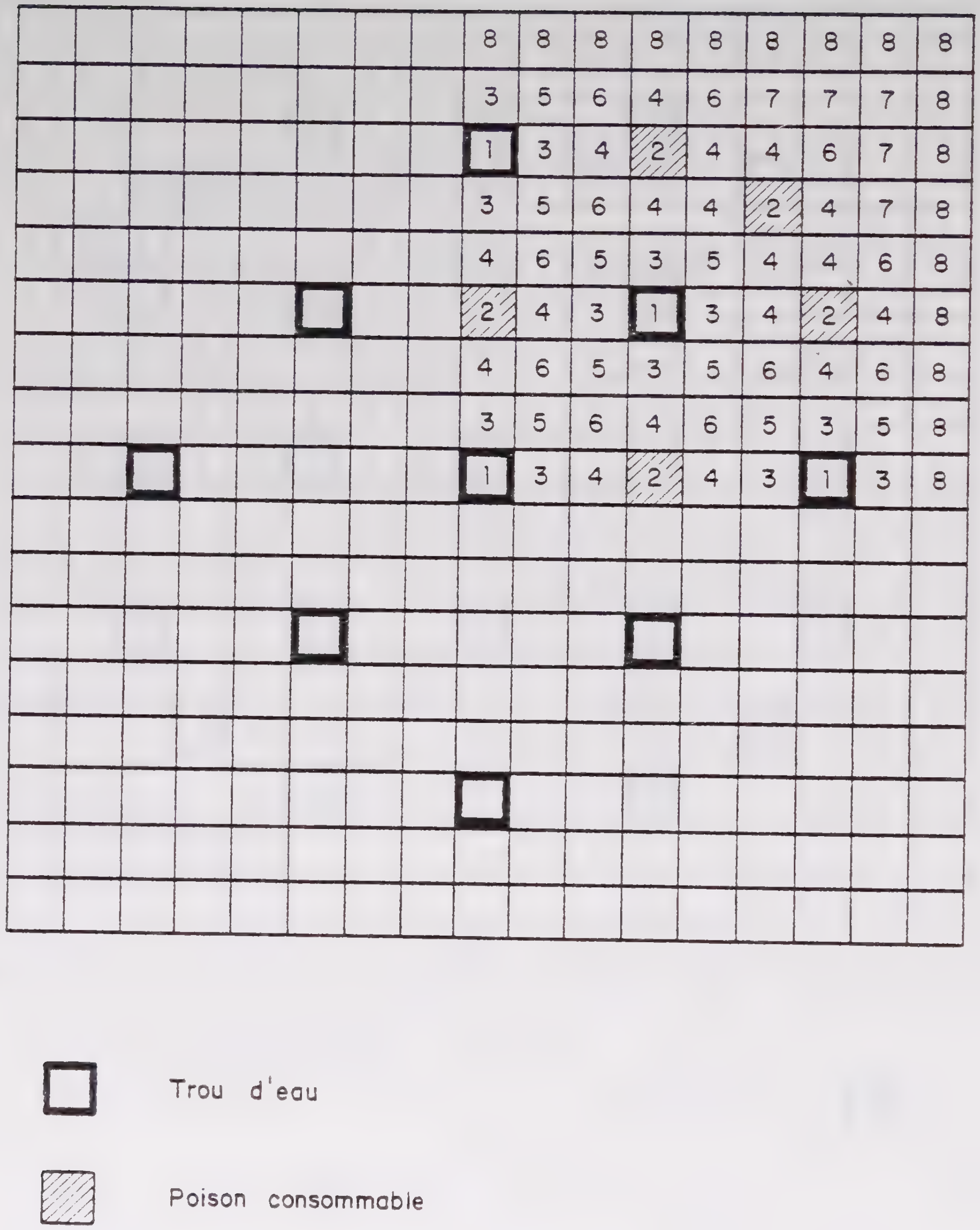


Figure II.1.b _ Représentation multicellule dans l'assemblage à 16 poisons.

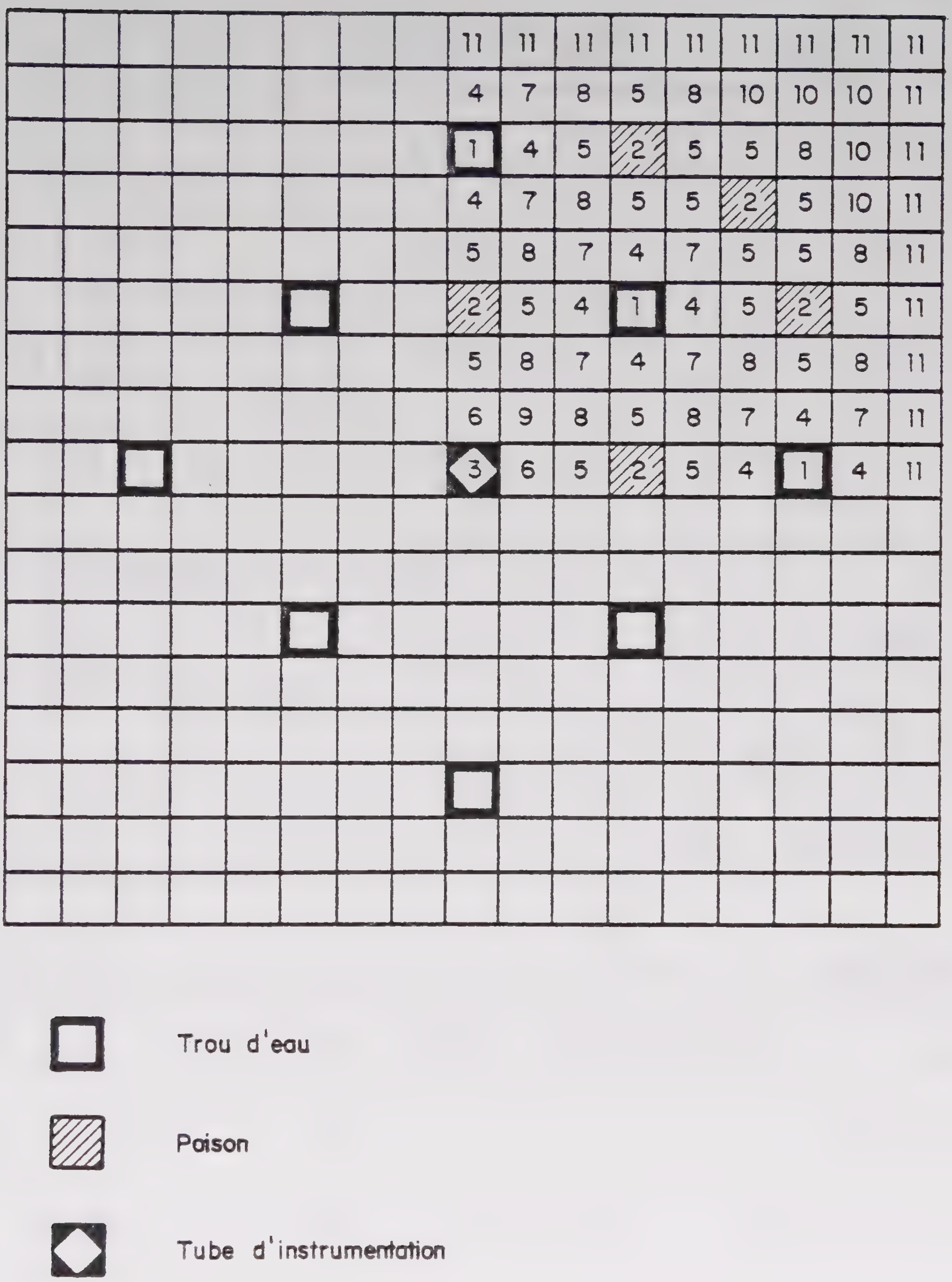


Figure II.1.c _ Représentation multicellule dans l'assemblage à 16 poisons et un tube d'instrumentation.

Type d'assemblage	Calcul APOLLO sans la chambre de fission(APU)	Calcul APOLLO avec la chambre de fission (APF)
2.1%	1.04025	1.03903 (-117)*
3.1%	1.16695	1.16575 (-102)
2.6% , 12 pc	1.00664	1.00556 (-107)
3.1% , 12 pc	1.06464	1.06356 (-102)
2.6% , 16 pc	0.97590	0.97483 (-110)
3.1% , 16 pc	1.03442	1.03334 (-104)
2.6% , 20 pc	0.94503	0.94396 (-114)

Tableau II.4 _ Valeurs de K_{inf} pour les deux calculs APOLLO avec et sans chambre de fission, (APU) et (APF).

* Ecart en pcm par rapport aux valeurs de calcul sans la chambre de fission.

II.2 - CALCUL DU COEUR A 2 DIMENSIONS (XY)

Introduction

Le calcul du coeur en début de vie (step zéro), à puissance nulle a été effectué à l'aide du code BILAN aux éléments finis à 2 groupes d'énergie et du code DIANE aux différences finies à 4 groupes d'énergie. La coupure thermique étant à 0.625 eV dans les deux cas.

On a "imposé" la valeur de la concentration en bore critique (1330 ppm) et un laplacien axial simulant les fuites axiales du coeur, calculé à partir de la hauteur active extrapolée du réacteur (H = 365.8 cm, B_g^2 = 0.68 E-04).

II.2.1 - Calcul du coeur BILAN

II.2.1.1 - Mise en oeuvre du code BILAN

- Les constantes neutroniques de chaque type d'assemblage sont issues de l'homogénéisation d'un calcul multicellule APOLLO (APU). L'assemblage est ainsi représenté par une seule zone homogène.

- Les constantes homogènes de réflecteur sont obtenues selon la méthode mise au point par P. REUSS - S. NISAN [19 , 20]. Cette méthode est basée sur un calcul à 1 dimension en géométrie plane, représentant le système (baffle + réflecteur) adjacent à un isotope combustible HOMOG issu de l'homogénéisation d'un assemblage périphérique. Le système (baffle + réflecteur) peut être remplacé grâce au programme REFLEC, par un milieu équivalent homogène en théorie à 2 groupes, ce qui réduit de façon non négligeable le coût du calcul de coeur. Pour les calculs de coeur neuf sans puissance la température de l'eau du réflecteur est de 286°C et la concentration en bore critique de 1330 ppm.

- Les polynômes d'interpolation représentant le flux sont des polynômes "paraboliques sans noeuds internes (PS8)" en X et Y.

- Le coeur présentant une symétrie, on ne représentera que le quart de coeur, divisé en 18x18 points de calcul, ce découpage nous donne 2x2 mailles par assemblage et pour le réflecteur.
  Le calcul est effectué sur 1/8 du coeur en utilisant l'option "périodicité diagonale".

- Les précisions demandées sont de 10^{-03} sur le flux et de 10^{-05} sur la valeur propre.

Ce calcul du coeur BILAN sera nommé (BILUPS8).

Il est intéressant d'effectuer un deuxième calcul du coeur BILAN en instrumentant tous les assemblages, afin de voir l'effet sur les résultats du calcul en début de vie, de maintenir les chambres de fission dans tous les assemblages.

Nous avons effectué ce calcul de coeur en utilisant les constantes homogènes de chaque assemblage issues de calcul APOLLO avec les chambres de fission (APF). Ce calcul BILAN sera nommé (BILFPS8).

II.2.1.2 - Calcul de l'activité

Comme nous l'avons indiqué précédemment, les activités sont calculées à partir :

- du flux au centre de chaque assemblage instrumenté fourni par un calcul de coeur,
- de la section efficace de fission de l'^{235}U dans la chambre de fission placée dans la cellule centrale.

Dans le calcul BILAN, le coeur est représenté par différents types d'assemblages homogénéisés (7 types d'assemblages) ce qui ne détermine, en fait, que la forme de flux macroscopique dans le coeur.

Il est nécessaire dans un assemblage comportant des hétérogénéités ayant un pouvoir très absorbant (poison consommable) ou très ralentisseur (trou d'eau) de tenir compte des variations du flux microscopique liées aux perturbations locales engendrées par ces hétérogénéités.

Nous sommes conduits à découpler le flux en deux termes :

- une forme macroscopique, calculable par BILAN,
- une forme microscopique, obtenue par un calcul multicellule APOLLO d'assemblage en mode fondamental (tenant compte des interactions entre les cellules de types différents).

Aussi, nous nous sommes proposés d'obtenir les activités à partir :

a - Du flux macroscopique ϕ_c au centre de chaque assemblage instrumenté fourni par un calcul BILAN (BILUPS8).

b - De la section efficace de fission de l'^{235}U, dans la cellule centrale fournie par la sortie homogène (sortie 100) d'un calcul multicellule APOLLO sans la chambre de fission (APU).

On obtient ainsi la section efficace de fission de l'isotope ^{235}U pondérée par le rapport du flux local régnant dans la cellule centrale (trou d'eau) au flux moyen dans l'assemblage.

$$\sigma_{100}(^{235}U,\ APU) = \sigma_{f\ \text{cellule centrale}} \times \frac{\frac{1}{V}\int_{\text{cellule centrale}} \phi \, dV}{\frac{1}{V}\int_{\text{assemblage}} \phi \, dV}$$

$$\sigma_{100}(^{235}U,\ APU) = \sigma_{f\ \text{cellule centrale}} \times \frac{\phi_{local}}{\bar{\phi}} = \sigma_f \, \psi$$

où ψ représente le flux microscopique dans la cellule centrale (trou d'eau).

Pour avoir l'activité au centre d'un assemblage il suffit de multiplier cette section efficace par le flux macroscopique ϕ_c.

$$\text{Activité} = \phi_c \times \sigma_{100}\ (^{235}U,\ APU) \qquad (1)$$

Dans un assemblage instrumenté, la perturbation liée à l'hétérogénéité de la cellule centrale trou d'eau est doublée d'une perturbation liée à la présence de la chambre de fission.

Nous devons en tenir compte, en effectuant un calcul supplémentaire APOLLO avec la chambre de fission (APF). Pour les assemblages instrumentés les activités seront calculées à partir du même flux macroscopique ϕ_c mais la section efficace de fission de l'^{235}U sera issue de la sortie homogène (sortie 100 d'APOLLO) d'un calcul APOLLO (APF) avec la chambre de fission, soit σ_{100} (^{235}U, APF).

Nous obtenons ainsi l'activité (A) au centre de chaque assemblage instrumenté comme étant

$$A = \phi_c \times \sigma_{100} \; (^{235}U,\ APF) \qquad (2)$$

Dans le cas du calcul BILAN du coeur avec les chambres de fission (BILFPS8), l'activité est aussi calculée à partir de la formule (2), mais évidemment, avec la valeur du flux au centre de chaque assemblage instrumenté ϕ_c issu de ce calcul (BILFPS8).

II.2.1.3 - Interprétation des résultats

a) Résultats expérimentaux

Les résultats expérimentaux des activités, sont donnés dans le tableau (II.5) pour les cinquante points de mesure dans le coeur. En fait les activités dans chaque assemblage instrumenté sont mesurées sur 57 plans axiaux et les activités qui sont représentées dans le tableau (II.5) sont les valeurs intégrées axialement pour chaque assemblage instrumenté.

Ces valeurs sont normalisées à 1 pour les cinquante assemblages.

Tenant compte de la symétrie du coeur, nous avons dans le tableau (II.6) la carte d'activités sur le 1/8 du coeur par rabattement des 50 valeurs afin de réduire l'effet des erreurs de mesure (nous avons des écarts des valeurs de mesures atteignant 6 % pour deux assemblages en position symétrique, A8-J15 et H1-P8).

b) Résultats du calcul et comparaisons calcul-expérience

- Nous avons calculé les activités au centre de chacun des 50 assemblages instrumentés en utilisant la relation (2) de (II.2.1.2). Le tableau (II.7) donne les valeurs d'activités (A) sur le 1/8 du coeur après les avoir normalisées à 1, ainsi que les écarts(*) aux valeurs expérimentales d'activités.

On constate :

. des écarts moyens au centre du coeur de - 3.53 % pour les assemblages enrichis à 2.1 % et de 8.86 % pour les assemblages enrichis à 2.6 %,

. un écart moyen de - 6.68 % pour les assemblages enrichis à 3.1 % en périphérie,

. un effet de damier de 12.39 % (l'effet de damier est calculé par lot pour les deux types d'assemblages différents suivants : les assemblages enrichis à 2.1 % et les assemblages enrichis à 2.6 %).

- Afin de voir l'effet sur le calcul d'activité dû à la présence de la chambre de fission, nous nous sommes proposés d'utiliser la relation (1) de (II.2.1.2) pour obtenir une carte d'activité (A1) et de comparer cette carte avec la carte expérimentale.

Le tableau (II.8) donne la carte d'activité (A1) ainsi que les écarts calcul-expérience. On remarque dans ce tableau :

. qu'au centre du coeur les écarts moyens sont de - 4.33 % pour les assemblages enrichis à 2.1 % et de 9.73 % pour les assemblages enrichis à 2.6 %,

. qu'en périphérie l'écart moyen est de - 6.18 % pour les assemblages enrichis à 3.1 %,

. un effet de damier de 14.06 %.

(*)Les écarts calcul-expérience sont des écarts relatifs [(calcul-expérience)/expérience] par rapport aux valeurs expérimentales d'activités, aucun écart absolu n'a été calculé.

Dans le tableau (II.9) nous avons les écarts entre les valeurs d'activités calculées (A1) et les valeurs d'activités (A) afin de voir directement les différences entre les deux calculs d'activités, écarts atteignant 1 %.

- Le calcul du coeur BILAN en instrumentant tous les assemblages (BILFPS8), nous fournit une seconde carte d'activité (A2), tableau (II.10).

Ce tableau nous montre :

. Des écarts moyens, au centre du coeur, de - 3.44 % et de 6.82 % pour les deux types d'assemblages : enrichis à 2.1 % et enrichis à 2.6 %.

. Un écart moyen de - 6.77 % pour les assemblages enrichis à 3.1 % en périphérie.

. Un effet de damier de 12.26 %.

Nous avons aussi comparé dans les deux cas de calculs BILAN, avec et sans les chambres de fission (BILUPS8 et BILFPS8), les valeurs propres, tableau (II.11), ainsi que les distributions de puissance moyenne sur les assemblages, tableau (II.12).

II.2.1.4 - Conclusion

a - On note l'amélioration apportée sur les résultats par le fait d'avoir tenu compte de la perturbation du flux microscopique dans la cellule centrale, liée à la présence de la chambre de fission.

Le calcul de la section efficace de fission de l'^{235}U dans la cellule centrale en omettant la présence de la chambre de fission, introduit une erreur variable de 21 % à 24 % selon l'assemblage sur le calcul de cette section et par conséquent entraîne un écart relatif de l'ordre de 1 % sur les activités obtenues à partir de cette même section.

b - On constate qu'en début de vie (step 0) le calcul du coeur BILAN en instrumentant tous les assemblages (BILFPS8) et le calcul du coeur BILAN sans les chambres de fissions (BILUPS8) donnent des résultats

comparables tant au niveau du calcul des valeurs propres (écarts - 114 pcm), qu'au niveau du calcul de puissances (écarts inférieurs à 0.1 %). Les deux calculs BILAN (BILUPS8, BILFPS8), donnent aussi des cartes d'activités très proches.

Ceci confirme le fait qu'on peut effectuer les calculs du coeur sans représenter explicitement la chambre de fission dans les cellules centrales à condition que l'on tienne compte de l'effet de perturbation lié à la présence de cette chambre de fission, pour calculer les activités.

c - Le tableau (II.7), représentant les activités calculées (A) et les écarts calcul-expérience, nous montrent :

. Un effet important de damier central 12.39 % indiquant une mauvaise évaluation de certains types d'assemblages, ce qui nous conduit à des écarts moyens importants - 3.53 % et 8.86 % au centre du coeur.

. Les assemblages périphériques sont tous sous-estimés (pouvant atteindre - 13 %) avec un écart moyen de - 6.68 %, surtout lorsqu'ils présentent 2 faces en contact avec le réflecteur (effet de coin sortant).

Au vu de ces résultats, nous pouvons proposer plusieurs interprétations pour les écarts constatés sur les activités entre calcul et expérience :

- soit un mauvais calcul du flux macroscopique ϕ_c, issu du calcul de diffusion BILAN du coeur, au centre de chaque assemblage,

- soit un mauvais calcul du flux microscopique, issu du calcul de transport APOLLO multicellule, dans la cellule centrale et par conséquent un mauvais calcul de la section efficace de fission de l'^{235}U dans la chambre de fission $\sigma_{100}(^{235}U, APF)$.

Pour tester les validités de ces deux hypothèses, nous avons décidé d'effectuer un calcul fin du coeur, à l'aide du code de diffusion DIANE adapté au traitement détaillé du coeur ; ceci, afin de comparer les résultats obtenus avec ceux du calcul de diffusion du coeur BILAN.

En ce qui concerne les écarts calcul-expérience particuliers, dans les assemblages périphériques, deux raisons majeures peuvent être invoquées :

- Soit le mauvais calcul des constantes homogènes de ces assemblages dû à ce que le code APOLLO effectuant le calcul en milieu infini, s'éloigne de la réalité au niveau de la périphérie du coeur, du fait des variations importantes du spectre dans ces zones frontières.

- Soit une mauvaise évaluation des constantes du réflecteur calculées à 1D pour un calcul de coeur à 2D ; effet 1D/2D.

Nous avons fait une étude-test afin de tenir compte des variations du spectre dans les assemblages périphériques lors du calcul des constantes homogènes de ces assemblages par le code APOLLO et d'en voir l'effet sur les résultats.

Des calculs sont actuellement en cours pour voir si une méthode utilisant les codes à 2 dimensions apporterait des modifications importantes.

Enfin, nous devons tenir compte de

- l'influence du couplage thermohydraulique : le calcul BILAN a été réalisé à puissance nulle tandis que la carte expérimentale d'activité a été établie à P = 5 % de la puissance nominale (138 MW) ;

- de l'effet 2D/3D : le calcul de coeur BILAN est à 2 dimensions, ce qui revient à négliger l'effet de répartition axiale de puissance ; le flux axial n'étant pas le même dans tous les assemblages.

Nous avons tenu compte de ces deux effets lors du calcul final de la carte d'activité.

	R	P	N	M	L	K	J	H	G	F	E	D	C	B	A
1								0.7548							
2										0.84697					
3				0.57038			1.2639	1.0735				0.57436			
4					0.88111			1.3416		1.2945					
5			0.75463		1.2215		1.3199				1.2640	0.90672		0.54676	
6					0.99007			1.3087		1.2511					
7			1.3062				1.2344		1.2723			1.0102		0.86319	
8	0.71033		1.0683		0.96651					1.2652			1.0556	1.2532	
9					1.3057				1.2810	0.97199					0.57321
10			0.93534				0.99463					1.1991		0.81683	
11					1.2636			0.93877		1.0030	1.2596				
12			0.55967				1.0485					1.0017	0.55988		
13								1.0853		0.96902					
14					0.55756				0.89420						
15							0.61180								

TABLEAU II.5 - CARTE EXPÉRIMENTALE D'ACTIVITÉ

	H	G	F	E	D	C	B	A
4					1.0017	0.5661		
5				1.2522	0.8939	0.7546	0.5522	
6			1.2511	0.9966	1.2468	0.9522	0.8319	
7		1.2626	0.9833	1.3128	1.0294	1.2851	0.8787	0.5925
8 (Assemblage central → H)			1.2870	0.9527	1.3416	1.0707	1.2532	0.7326

Tableau II.6 _ Carte expérimentale d'activité rabattue par symétrie sur le 1/8 de cœur.

4					0.9326 -6.90	0.5072 -10.40		
5				1.1898 -4.98	0.9393 5.08	0.7653 1.42	0.4891 -11.48	
6			1.2700 1.51	1.0908 9.45	1.2183 -2.29	0.9746 2.35	0.7625 -8.34	
7		1.2098 -4.18	1.0944 11.30	1.2632 -3.78	1.1166 8.47	1.2748 -0.80	0.9097 3.53	0.5168 -12.78
8 (Assemblage central → first cell)			1.2257 -4.76	1.0671 12.01	1.3050 -2.73	1.1897 11.11	1.2139 -3.14	0.7257 -0.94

Legend: C / $\frac{C}{E} - 1\%$

C : Calcul
E : Expérience

Tableau II.7 _ Carte d'activité (A).

					0.9251 -7.65	0.5089 -10.10		
				1.1799 -5.77	0.9467 5.91	0.7733 2.48	0.4905 -11.17	
			1.2593 0.66	1.0998 10.36	1.2083 -3.09	0.9820 3.13	0.7648 -8.07	
		1.1995 -5.00	1.1034 12.21	1.2526 -4.59	1.1258 9.36	1.2642 -1.63	0.9219 4.92	0.5181 -12.56
Assemblage central →			1.2152 -5.58	1.0773 13.08	1.2943 -3.53	1.1979 11.88	1.2041 -3.92	0.7287 -0.53

C

$\frac{C}{E} - 1\%$

C : Calcul
E : Expérience

Tableau II.8 _ Carte d'activité (A1).

$$\text{Ecart} = \frac{A_1}{A} - 1\%$$

					-0.80	0.34		
				-0.83	0.79	1.05	0.29	
			-0.84	0.83	-0.82	0.76	0.30	
		-0.85	0.82	-0.84	0.82	-0.83	1.34	0.25
Assemblage central →			-0.86	0.96	-0.82	0.69	-0.81	0.41

Tableau II.9 _ Ecart entre les deux cartes d'activité (A) et (A1).

					0.9329 -6.87	0.5076 -10.33		
				1.1896 -5.00	0.9395 5.10	0.7658 1.48	0.4896 -11.34	
			1.2694 1.46	1.0906 9.43	1.2183 -2.29	0.9750 2.39	0.7631 -8.27	
		1.2088 -4.26	1.0938 11.24	1.2627 -3.82	1.1165 8.48	1.2750 -0.79	0.9101 3.57	0.5172 -12.71
Assemblage central →			1.2248 -4.83	1.0665 11.94	1.3047 -2.75	1.1900 11.14	1.2144 -3.10	0.7262 -0.87

C $\frac{C}{E}$ - 1%

C : Calcul
E : Expérience

Tableau II . 10 _ Carte d'activité (A2).

	Calcul BILAN BILUPS8	Calcul BILAN BILFPS8
VP	0 . 99882	0 . 99768 (- 114 pcm)

Tableau II . 11 _ Effet de l'instrumentation de tous les assemblages sur la valeur propre de calcul de cœur.

$$\text{Ecart} = \frac{P_2}{P} - 1\%$$

					0.02	0.07		
				0.00	0.02	0.06	0.10	
			-0.09	-0.09	0.00	0.00	0.07	
		-0.09	-0.09	0.00	-0.09	0.00	0.00	0.08
Assemblage central →	-0.10	-0.10	-0.09	-0.09	0.00	0.00	0.00	0.07

Tableau II.12 _ Ecart entre les deux cartes de puissance P_2 et P.

II.2.2 - Calcul de coeur DIANE

II.2.2.1 - Mise en oeuvre du code DIANE

- Les paramètres moyens des milieux homogènes équivalents à chaque type de cellule sont issus d'un calcul multicellule APOLLO (APU).

- Les constantes de réflecteur (représenté explicitement par son baffle en acier et de l'eau) sont déterminées par la méthode S. NISAN [19] , définie précédemment.

- Le quart du coeur est divisé en 141 x 141 points de calcul, ce qui donne un maillage d'une maille par cellule pour le coeur et en dégradé pour le réflecteur sur les bords du coeur.

- Le calcul est effectué sur le 1/8 du coeur en utilisant l'option "périodicité diagonale".

- Le calcul de diffusion DIANE ne pouvant prendre correctement en compte le fort gradient de flux au voisinage des fortes hétérogénéités que sont les poisons consommables, il est nécessaire de procéder à l'ajustement des sections efficaces d'absorption de ces poisons consommables issues du calcul APOLLO (APU), afin de conserver les taux de réactions entre le calcul de diffusion et le calcul de transport. Le programme EQUIPAGE [12] procède à ces ajustements.

II.2.2.2 - Calcul de l'activité

a - Les activités (A_{DU}) sont issues directement, comme le taux de réaction de fission de l'^{235}U dans la cellule centrale, du calcul DIANE à partir :

- du flux moyen dans la cellule centrale ; ce flux se compose de la forme macroscopique et de la forme microscopique ;

- de la section efficace de fission de l'^{235}U dans la cellule centrale fournie par la sortie, sur cette cellule centrale, de calcul APOLLO (APU), c'est $\sigma_{cc}(^{235}U, APU)$.

Par cette méthode l'effet de la perturbation liée à la présence de la chambre de fission n'est pas prise en compte et les activités (A_{DU}) sont comparables aux activités (A1) du calcul BILAN [la formule (1) de (II.2.1.2)].

b - Nous devons prendre en considération la perturbation du flux microscopique, dans la cellule centrale, due à la présence de la chambre de fission en modifiant dans les données du calcul DIANE la section efficace de fission de l'^{235}U présent dans la cellule centrale $\sigma_{cc}(^{235}U, APU)$.

Le but de cette modification est d'obtenir pour un assemblage le taux de réaction de fission de l'^{235}U dans la cellule centrale (issu d'un calcul de diffusion sur cet assemblage), égal au taux de réaction de fission de l'^{235}U dans la chambre de fission [issu d'un calcul APOLLO (APF) sur le même assemblage].

$$\sigma_{f\ modifié}\ \phi_{diffusion} = \sigma_f\ \phi_{transport}$$

$$= \frac{(\text{taux de réaction de fission})_{APF}^{235U}}{\text{no. d'atomes de l'}^{235}U/\ cm^3}$$

$$\text{d'où}\quad \sigma_{f\ modifié} = \frac{(\tau_f)_{APF}^{235U}}{\phi_{diffusion}\ N^{235U}}$$

Les sections microscopiques de fission sont ainsi modifiées d'environ 10 % dans le groupe thermique.

Les activités (A_{DF}) dans les cellules centrales issues du calcul DIANE, sont calculées avec le flux microscopique du calcul APOLLO avec la chambre de fission (APF). Ces activités (A_{DF}) sont comparables aux activités (A) du calcul du coeur BILAN [la formule (2) de (II.2.1.2)].

II.2.2.3 - Interprétation des résultats

a - Nous avons une carte d'activité (A_{DU}) ; sans l'effet de la chambre de fission, sur le 1/8 du coeur, ainsi que les écarts calcul-expérience dans le tableau (II.13).

On remarque :

- Un écart moyen de 2.33 % pour les assemblages enrichis à 2.1 % et de 0.99 % pour les assemblages enrichis à 2.6 %.

- Un écart moyen de - 7.61 % pour les assemblages enrichis à 3.1 % en périphérie.

- Un effet de damier de 1.34 %.

b - La carte d'activité (A_{DF}) ; avec l'effet de la chambre de fission et les écarts avec les valeurs d'activités expérimentales sont donnés dans le tableau (II.14).

On constate :

- Des écarts moyens au centre du coeur de 1.67 % pour les assemblages enrichis à 2.1 % et de 1.53 % pour les assemblages enrichis à 2.6 %.

- un écart moyen de - 7.0 % en périphérie.

- L'effet de damier est, dans ce cas, presque inexistant.

II.2.2.4 - Conclusion

La carte d'activité (A_{DU}) obtenue par le calcul DIANE sans prise en compte de la chambre de fission, tableau (II.13), est en accord avec la carte expérimentale d'activités pour les assemblages au centre du coeur, mais sous-estime les valeurs de l'activité pour les assemblages en périphérie du coeur. L'effet de damier existe, mais reste faible 1.34 %.

L'influence de la prise en considération de la chambre de fission, sur les résultats de calcul d'activités, est montrée dans le tableau (II.14). Au centre du coeur, les activités s'accordent avec les mesures expérimentales (l'écart moyen est inférieur à 2 %). L'effet de damier n'existe plus, mais en ce qui concerne les assemblages périphériques les activités demeurent sous-estimées (écart moyen de - 7 %).

				0.9735 -2.82	0.5158 -8.89		
			1.2661 1.11	0.8847 -1.03	0.7237 -4.09	0.4945 -10.45	
		1.3429 7.34	1.0079 1.13	1.2921 3.63	0.9276 -2.58	0.7748 -6.86	
	1.2742 0.92	1.0034 2.04	1.3421 2.23	1.0348 0.52	1.3578 5.66	0.8352 -4.95	0.5289 -10.73
Assemblage central →		1.3020 1.17	0.9866 3.56	1.3955 4.02	1.0935 2.13	1.2926 3.14	0.7014 -4.26

C
$\frac{C}{E} - 1\%$

C : Calcul
E : Expérience

Tableau II. 13 _ Carte d'activité (A_{DU}).

				0.9673 -3.43	0.5185 -8.41		
			1.2580 0.46	0.8857 -0.92	0.7416 -1.72	0.4970 -10.00	
		1.3343 6.65	1.0090 1.24	1.2839 2.98	0.9287 -2.47	0.7788 -6.38	
	1.2661 0.28	1.0045 2.16	1.3334 1.57	1.0360 0.64	1.3491 4.98	0.8403 -4.37	0.5316 -10.28
Assemblage central →		1.2936 0.51	0.9817 3.04	1.3865 3.35	1.1165 4.28	1.2843 2.48	0.7049 -3.78

C
$\frac{C}{E} - 1\%$

C : Calcul
E : Expérience

Tableau II. 14 _ Carte d'activité (A_{DF})

Compte tenu du fait que le calcul du coeur DIANE nous a donné des résultats satisfaisants (en ce qui concerne les assemblages en périphérie, le problème sera évoqué plus tard), nous pouvons comparer les deux calculs de diffusion DIANE et BILAN afin de connaître les raisons pour lesquelles les résultats diffèrent.

II.2.3 - Comparaison des résultats de calcul du coeur DIANE et BILAN

- Pour réaliser cette comparaison il est nécessaire de définir le flux ϕ calculé pour un point (i) sur un assemblage (J) dans le coeur ; soit

$$\phi_{i,J} = \overline{\Phi}_J \times grad_J \times \varphi_{i,J}$$

et $\overline{\Phi}_J \times grad_J$ = flux macroscopique

$grad_J \times \varphi_{i,J}$ = structure fine du flux

où

$\overline{\Phi}_J$ est le flux moyen dans l'assemblage J.

$grad_J$ est le gradient du flux dans l'assemblage J, fonction de sa position dans le coeur.

$\varphi_{i,J}$ est le flux microscopique pour le point (i) dans l'assemblage J, fonction de la position de ce point par rapport aux autres points dans l'assemblage.

Ce flux $\phi_{i,J}$ multiplié par la section efficace de fission de l'^{235}U donne l'activité.

- Par les deux calculs du coeur, le calcul BILAN et le calcul DIANE nous sommes en possession de cartes d'activité pour les deux différents cas :

  . l'un sans l'effet de la chambre de fission
  . l'autre avec l'effet de la chambre de fission

  Les comparaisons des résultats porteront pour chaque cas sur les quantités suivantes :

. les activités
. le gradient
. le flux microscopique
. la structure fine

au centre de certains assemblages se trouvant sur l'axe, figure II.2. Ceci, dans le but de comparer les composantes de flux $\phi_{i,J}$ et d'en déduire les raisons pour lesquelles les activités sont différentes.

II.2.3.1 - Calcul d'activités sans l'effet de la chambre à fission

a) Nous nous trouvons en possession de deux cartes d'activités :

- La carte d'activité (A1), tableau (II.8), est obtenue à partir :

  . du flux macroscopique calculé par le calcul du coeur BILAN (BILUPS8),

  . du flux microscopique calculé par le calcul milticellule APOLLO sans la chambre de fission (APU).

- La carte d'activité (A_{DU}), tableau (II.13), fournie par :

  . les deux composantes du flux macroscopique et microscopique calculées par le calcul du coeur DIANE.

b) Résultats et conclusion

Le tableau (II.15), comparaison des deux cartes d'activité (A1) et (A_{DU}), fait apparaître de grands écarts entre les valeurs de ces deux cartes, surtout au centre du coeur où les écarts moyens atteignent - 6.50 % pour les assemblages enrichis à 2.1 % et 8.63 % pour les assemblages enrichis à 2.6 %. L'écart sur l'effet de damier s'élève à 15.13 %.

En ce qui concerne les autres paramètres, flux microscopique, gradient et structure fine du flux, les valeurs et les écarts entre les deux calculs sont donnés dans le tableau (II.16), pour le groupe thermique qui est le plus représentatif.

Du tableau (II.16) nous remarquons que les valeurs d'activités (A1) obtenues à l'aide du calcul BILAN sont plus faibles dans les assemblages enrichis à 2.1 % [n° 1, 3, 5] avec des écarts respectivement égaux à - 6.67 %, - 7.25 % et - 6.85 % mais sont plus élevées dans les assemblages enrichis à 2.6 % et dans l'assemblage périphérique, de 9.19 %, 9.55 % et 3.89 %.

La cause de ces écarts entre les activités (A1) et (A_{DU}) peut être imputée :

- soit aux écarts des gradients de flux respectivement - 3.18 %, - 3.03 % et - 3.56 % pour les assemblages 1, 3, 5 et 6.75 %, 5,75 % et 3.50 % pour les assemblages 2, 4, 6,

- soit aux écarts du flux microscopique. On remarque que les valeurs du flux microscopique calculées par APOLLO (APU) sont plus élevées que celles calculées par DIANE ; ces écarts sont toujours positifs, soit :

7.15 % pour les assemblages 1, 3, 5 et 12.12 %, 14.16 % et 10.14 % pour les assemblages 2, 4, 6.

Ils diffèrent en valeur absolue, ce qui contribue à augmenter l'écart, d'environ 5 % (12 % - 7 %)

- soit les deux causes précédentes réunies, ce qui apparaît dans les écarts suivants entre les valeurs de structure fine,

  4.10 %, 4.26 % et 3.68 % pour les assemblages 1, 3 et 5

  19.63 %, 20.74 % et 13.99 % pour les assemblages 2, 4 et 6.

II.2.3.2 - Calcul d'activité avec l'effet de la chambre à fission

a) Dans ce cas, nous obtenons :

- La carte d'activité (A), tableau (II.7), fournie par :
  - le même flux macroscopique calculé par le calcul BILAN (BILUPSE)
  - et par le flux microscopique calculé par le calcul APOLLO avec la chambre de fission (APF).

- La carte d'activité (A_{DF}), tableau (II.14) est obtenue à partir :

  . du flux macroscopique calculé par le calcul DIANE,

  . du flux microscopique calculé par le calcul APOLLO avec la chambre de fission (APF).

Nous avons le même flux microscopique quel que soit le calcul d'activité (A) ou (A_{DF}).

b) Résultats et conclusion

Le tableau (II.17), comparaison entre ces deux cartes d'activités (A) et (A_{DF}) nous montre que les écarts sont élevés et atteignent des valeurs moyennes de - 5.11 % pour les assemblages enrichis à 2.1 % et de 7.21 % pour les assemblages enrichis à 2.6 %, introduisant un écart de 12.32 % sur l'effet de damier.

Le flux microscopique, identique entre les deux calculs, ne peut évidemment pas être à l'origine des différences observées entre les résultats précédents.

Nous pouvons en conclure que c'est la différence entre les calculs du gradient dans les deux calculs de diffusion BILAN et DIANE, qui est la cause des écarts obtenus.

D'ailleurs on voit clairement, dans le tableau (II.18), une corrélation entre les écarts en activités et les écarts en gradient :

soit - 5.24 %, - 5.88 % et - 5.48 pour les activités
et - 3.18 %, - 3.03 % et - 3.56 pour les gradients

pour les assemblages 1, 3, 5

soit 8.70 %, 6.56 % et 2.95 % pour les activités
et 6.75 %, 5.75 % et 3.50 % pour les gradients

pour les assemblages 2, 4, 6.

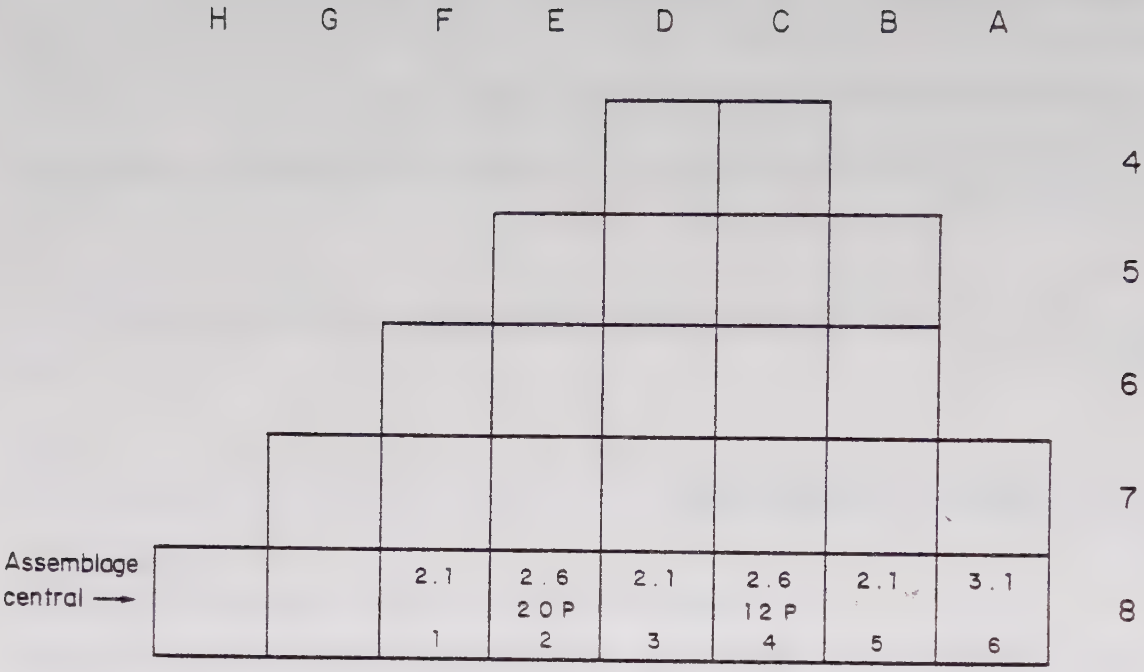


Figure II. 2

$$\text{Ecart} = \frac{A_1}{A_{DU}} - 1\ \%$$

	H	G	F	E	D	C	B	A
4					-4.97	-1.34		
5				-6.81	7.01	6.85	-0.81	
6			-6.23	9.12	-6.49	5.86	-1.29	
7		-5.86	9.97	-6.67	8.79	-6.89	10.38	-2.04
8 (Assemblage central →)			-6.67	9.19	-7.25	9.55	-6.85	3.89

Tableau II . 15 _ Ecarts entre les deux cartes d'activités (A1) et (A_{DU}).

Numéro de l'assemblage	Activité	Gradient	Flux microscopique	Structure fine
	A1	Calcul BILAN	Calcul APOLLO	APOLLO/BILAN (C_1)
	A_{DU}	Calcul DIANE	Calcul DIANE	Calcul DIANE (C_2)
	$\left[\frac{A_1}{A_{DU}}-1\right]$	Ecart $\left[\frac{BILAN}{DIANE}-1\right]$	Ecart $\left[\frac{APOLLO}{DIANE}-1\right]$	Ecart $\left[\frac{C_1}{C_2}-1\right]$
1	1.2152	1.0063	1.1252	1.1323
	1.3020	1.0393	1.0466	1.0877
	-6.67	-3.18	7.51	4.10
2	1.0773	0.9996	1.2636	1.2631
	0.9866	0.9364	1.127	1.0553
	9.19	6.75	12.12	19.69
3	1.2943	1.0074	1.1252	1.1335
	1.3955	1.0388	1.0466	1.0872
	-7.25	-3.03	7.51	4.26
4	1.1979	1.0231	1.1915	1.2190
	1.0935	0.9675	1.0435	1.0096
	9.55	5.75	14.18	20.74
5	1.2041	1.0154	1.1252	1.1425
	1.2926	1.0529	1.0466	1.1020
	-6.85	-3.56	7.51	3.68
6	0.7287	1.0790	1.1635	1.2554
	0.7014	1.0425	1.0564	1.1013
	3.89	3.50	10.14	13.99

Tableau II. 16 _ Comparaison des résultats de calcul dans le cas sans l'effet de la chambre de fission.

Ecart $= \frac{A}{A_{DF}} - 1\%$

					-3.59	-2.18		
				-5.42	6.05	3.20	-1.59	
			-4.82	8.11	-5.11	4.94	-2.09	
		-4.45	8.95	-5.26	7.78	-5.51	8.26	-2.78
Assemblage central →			-5.25	8.70	-5.88	6.56	-5.48	2.95

Tableau II.17 _ Ecarts entre les deux cartes d'activités (A) et (A_{DF}).

Numéro de l'assemblage	Activité	Gradient	Flux microscopique	Structure fine
	A A_{DF} $\left[\frac{A}{A_{DF}}-1\right]$	Calcul BILAN Calcul DIANE Ecart $\left[\frac{BILAN}{DIANE}-1\right]$	Calcul APOLLO	APOLLO/BILAN (C_1) APOLLO/DIANE (C_2) Ecart $\left[\frac{C_1}{C_2}-1\right]$
1	1.2257 1.2936 -5.24	1.0063 1.0393 -3.18	1.0169 1.0169 0.	1.0233 1.0569 -3.18
2	1.0671 0.9817 8.70	0.9996 0.9364 6.75	1.1247 1.1247 0.	1.1243 1.0532 6.75
3	1.3050 1.3865 -5.88	1.0074 1.0388 -3.03	1.0169 1.0169 0.	1.0244 1.0564 -3.03
4	1.1897 1.1165 6.56	1.0231 0.9675 5.75	1.0632 1.0632 0.	1.0878 1.0286 5.75
5	1.2139 1.2843 -5.48	1.0154 1.0529 -3.56	1.0169 1.0169 0.	1.0326 1.0707 -3.56
6	0.7257 0.7049 2.95	1.0790 1.0425 3.50	1.04041 1.04041 0.	1.1226 1.0846 3.50

Tableau II.18 _ Comparaison des résultats de calcul dans le cas avec l'effet de la chambre de fission.

II.2.3.3 - Conclusion

De ces comparaisons, nous pouvons conclure que les grands écarts calcul-expérience observés sur les valeurs d'activités obtenues par le calcul de coeur BILAN, sont liés au fait que le gradient de flux dans les assemblages est incorrectement calculé.

Dans notre calcul du coeur BILAN (BILUPS8), deux raisons peuvent en être la cause :

- Les polynômes d'interpolation représentant le flux qui sont des polynômes "paraboliques sans noeuds internes (PS8)".

- Le maillage du calcul ; 2 x 2 mailles par assemblage, n'est peut-être pas assez fin.

Par conséquent, nous avons décidé de réaliser le calcul BILAN avec :

- soit un polynôme d'interpolation plus précis,
- soit un maillage du calcul plus fin

et d'étudier l'effet sur le calcul du flux et par conséquent sur le calcul d'activités, apporté par ces modifications.

II.2.4 - Influence du polynôme d'interpolation et du maillage de calcul sur le calcul du flux

II.2.4.1 - Effet des polynômes d'interpolation de flux

- Le calcul du coeur BILAN a été réalisé en utilisant les polynômes d'interpolation suivants, pour calculer le flux

  . Des Paraboliques Lagrange (PL9) ; (BILUPL9).
  . Des Cubiques sans noeuds internes (CS12) ; (BILUCS12).
  . Des Cubiques Lagrange (CL16) ; (BILUCL16).

- Des cartes d'activités (A_{PL9}), (A_{CS12}) et (A_{CL16}) ont été obtenues par la formule (2) de (II.2.1.2) et les écarts avec la carte expérimentale ont été calculés ; tableaux (II.19), (II.20) et (II.21).

Nous observons que les valeurs d'activité calculées sont améliorées de façon sensible par le choix du polynôme.

En ce qui concerne les deux premiers cas [paraboliques Lagrange (PL9) et cubiques sans noeuds internes (CS12)] les résultats sont proches et les écarts moyens avec l'expérience s'élèvent respectivement à - 0.83 % et - 0.49 % pour les assemblages enrichis à 2.1 %, 4.78 % et 4.02 % pour les assemblages enrichis à 2.6 %. L'effet de damier est de 5.61 % et 4.51 % ; l'écart moyen pour les assemblages périphériques est de - 6.38 % et - 5.92 %.

Quant au calcul avec des polynômes cubiques Lagrange (CL16), les résultats se sont améliorés et les écarts moyens se réduisent respectivement à 0.93 % et 1.75 % pour les assemblages enrichis à 2.1 % et à 2.6 %. L'effet de damier a disparu et l'écart moyen dans les assemblages périphériques est de - 5.61 %.

- Nous sommes maintenant en possession de quatre calculs de diffusion BILAN paramétrés en fonction du polynôme d'interpolation choisi.

Soit "Paraboliques sans noeuds internes" calculés auparavant (BILUPS8), soit les polynômes définis ci-dessus.

Les valeurs propres sont indiquées pour chaque calcul dans le tableau (II.22). Les écarts entre les derniers calculs BILAN par rapport au premier (BILUPS8) sont faibles : - 8 pcm, - 23 pcm, - 34 pcm.

Les écarts sur la distribution de puissance ainsi que sur la carte d'activité sont donnés dans les tableaux (II.23) et (II.24).

On note de faibles écarts sur la distribution de puissance (de 0 à 1 % au centre et - 1.7 % en périphérie) ; par contre pour les cartes d'activité les écarts sont importants. Nous atteignons, dans le cas (CL16), des écarts moyens de - 4.41 % pour les assemblages enrichis à 2.1 % et de 7 % pour les assemblages enrichis à 2.6 % ce qui conduit à un effet de damier de 11.41 % ; toutefois dans les assemblages périphériques, l'écart moins important est de - 1.22 %.

- Il serait intéressant de voir l'effet du degré du polynôme sur le calcul du flux moyen, du gradient et du flux au centre des assemblages. Nous avons donné les valeurs de ces paramètres dans le tableau (II.25), pour les assemblages figure II.2 ; dans les deux cas de calculs (BILUPS8) et (BILUCL16).

Nous constatons que l'effet sur le calcul du flux moyen est faible (de 0.04 % à 1 %), tandis que l'effet sur le gradient et par conséquent sur les valeurs du flux au centre des assemblages est important : de l'ordre de - 5 % pour les assemblages 1, 3 et 5 et de l'ordre de 10.21 %, 7.51 % et 1.14 % pour les assemblages 2, 4 et 6.

Conclusion

Il faut noter que le changement du degré des polynômes d'interpolation du flux n'a pas d'influence sur le calcul de flux moyen dans les assemblages, tableau (II.25),et par conséquent sur le calcul de la valeur propre et sur le calcul de la puissance moyenne, tableaux (II.22) et (II.23).

Il est important d'autre part de constater que le choix de ces polynômes a un effet important sur le calcul de gradient du flux et par conséquent sur le calcul du flux en certains points de l'assemblage.

L'amélioration apportée par le choix des polynômes sur le calcul d'activité est, en fait, liée au calcul de flux au centre des assemblages qui diffère d'une approximation à une autre.

Compte tenu des résultats du calcul d'activité, tableaux (II.19) à (II.21), les polynômes (PL9) et (CS12) ne calculent pas suffisamment bien les gradients, ce qui nécessite l'utilisation des polynômes (CL16) comme polynômes d'interpolation du flux ; ce choix nous donne une nette amélioration du calcul d'activité.

				0.9423 -5.93	0.5152 -8.99		
			1.2251 -2.16	0.9117 1.99	0.7620 0.98	0.4970 -10.0	
		1.3059 4.38	1.0469 5.05	1.2487 0.15	0.9513 -0.09	0.7748 -6.86	
	1.2468 -1.25	1.0488 6.66	1.3008 -0.91	1.0717 4.11	1.3105 1.98	0.8760 -0.31	0.5298 -10.58
Assemblage central →		1.2635 -1.83	1.0197 7.03	1.3420 0.03	1.1430 6.75	1.2455 -0.61	0.7133 -2.63

C
$\frac{C}{E}-1\%$

C : Calcul
E : Expérience

Tableau II.19 _ Carte d'activité (A_{PL9}).
du calcul BILAN (BILUPL9).

				0.9585 -4.31	0.5165 -8.76		
			1.2277 -1.96	0.9069 1.45	0.7586 0.53	0.5037 -8.78	
		1.3073 4.49	1.0362 3.97	1.2553 0.68	0.9504 -0.19	0.7793 -6.32	
	1.2466 -1.27	1.0374 5.50	1.3025 -0.78	1.0615 3.12	1.3184 2.59	0.8699 -1.00	0.5351 -9.69
Assemblage central →		1.2637 -1.81	1.0052 5.51	1.3453 0.28	1.1392 6.40	1.2600 0.54	0.7229 -1.32

C
$\frac{C}{E}-1\%$

C : Calcul
E : Expérience

Tableau II.20 _ Carte d'activité (A_{CS12})
du calcul BILAN (BILUCS12).

	H	G	F	E	D	C	B	A
4					0.965 -3.66	0.522 -7.79		
5				1.246 -0.50	0.891 -0.32	0.757 0.32	0.509 -7.82	
6			1.325 5.91	1.011 1.44	1.272 2.02	0.937 -1.60	0.788 -5.28	
7		1.266 0.27	1.011 2.82	1.321 0.62	1.037 0.74	1.340 4.27	0.852 -3.04	0.543 -8.35
8	Assemblage central →		1.282 -0.39	0.978 2.66	1.364 1.67	1.115 4.14	1.277 1.90	0.717 -2.13

Légende : C
$\frac{C}{E} - 1\%$

C : Calcul
E : Expérience

Tableau II.21 _ Carte d'activité (A_{ACL16}) du calcul BILAN (BILUCL16).

Calcul BILAN	Valeur propre	Ecart en pcm
BILUPS8	0.99882	
BILUPL9	0.99890	- 8
BILUCS12	0.99905	-23
BILUCL16	0.99916	-34

Tableau II.22 _ Ecart entre la valeur propre du calcul BILUPS8 et les valeurs propres du calcul BILUPL 9, BILUCS12 et BILUCL 16.

* $(P_{PS8} / P_{PL9}) - 1\%$
* $(P_{PS8} / P_{CS12}) - 1\%$
* $(P_{PS8} / P_{CL16}) - 1\%$

					-0.16 -0.64 -0.89	-0.39 -1.01 -1.57		
				-0.09 -0.09 -0.19	0.08 0.28 0.40	-0.09 -0.16 -0.31	-0.32 -1.30 -1.73	
			0.00 0.17 0.17	0.26 0.70 1.06	-0.09 -0.18 -0.36	0.10 0.10 0.19	-0.21 -0.79 -1.10	
		-0.09 0.18 0.09	0.26 0.88 1.33	-0.09 0.09 0.00	0.26 0.69 0.95	-0.09 -0.26 -0.43	0.09 0.09 0.19	-0.27 -1.28 -1.70
Assemblage central →	0.00 0.29 0.10	0.29 0.96 1.36	0.00 0.18 0.18	0.27 0.91 1.28	-0.08 0.00 -0.08	0.20 0.40 0.64	-0.09 -0.55 -0.73	0.02 -0.85 -0.84

Tableau II. 23 _ Ecarts entre la carte de puissance (BILUPS8) et les cartes de puissance (BILUPL9), (BILUCS12) et (BILUCL16).

$(A_{PS8} / A_{PL9}) - 1\%$
$(A_{PS8} / A_{CS12}) - 1\%$
$(A_{PS8} / A_{CL16}) - 1\%$

					-1.03 -2.70 -3.36	-1.55 -1.80 -2.84		
				-2.88 -3.09 -4.51	3.03 3.57 5.42	0.43 0.88 1.10	-1.59 -2.90 -3.91	
			-2.75 -2.85 -4.15	4.19 5.27 7.89	-2.43 -2.95 -4.22	2.45 2.55 4.01	-1.59 -2.16 -3.24	
		-2.97 -2.95 -4.44	4.35 5.49 8.25	-2.89 -3.02 -4.38	4.19 5.19 7.68	-2.72 -3.31 -4.87	3.85 4.58 6.77	-2.45 -3.42 -4.83
Assemblage central →			-2.99 -3.01 -4.39	4.65 6.16 9.11	-2.76 -3.00 -4.33	4.09 4.43 6.70	-2.54 -3.66 -4.94	1.74 0.39 1.21

Tableau II. 24 _ Ecarts entre la carte d'activité (APS8) et les cartes d'activité (APL9), (ACS 12) et (ACL 16).

Numéro de l'assemblage	Flux moyen	Gradient	Flux au centre
	Calcul BILUPS8 Calcul BILUCL16 Ecart $\left[\frac{BILUPS8}{BILUCL16} - 1\right]$	Calcul BILUPS8 Calcul BILUCL16 Ecart $\left[\frac{BILUPS8}{BILUCL16} - 1\right]$	Calcul BILUPS8 Calcul BILUCL16 Ecart $\left[\frac{BILUPS8}{BILUCL16} - 1\right]$
1	22.6899 22.6766 0.04	1.0063 1.0663 -5.63	22.833 24.18 -5.58
2	18.2437 17.9784 1.45	0.9996 0.9205 8.59	18.236 16.55 10.21
3	24.1500 24.2112 -0.25	1.0074 1.0631 -5.24	24.329 25.74 -5.48
4	20.984 20.8248 0.77	1.0231 0.9590 6.69	21.468 19.97 7.51
5	22.283 22.5137 -1.02	1.0154 1.0709 -5.18	22.627 24.11 -6.14
6	12.3140 12.4228 -0.81	1.0790 1.0577 2.01	13.287 13.14 1.14

Tableau II.25 _ Comparaison de résultats de deux calculs BILAN BILUPS8 et BILUCL 16.

II.2.4.2 - Effet de maillage du calcul

Nous avons effectué le calcul BILAN en changeant le maillage de (2 x 2) mailles par assemblage (BILUPS8) à (4 x 4) mailles par assemblage c'est (BILUPS8f).

La carte d'activité (A_{PS8f}) calculée à partir de ce calcul (BILUPS8f) ainsi que les écarts calcul-expérience, sont représentés dans le tableau (II.26) ; les écarts moyens sont de 0.69 % pour les assemblages enrichis à 2.1 %, de 2.34 % pour les assemblages enrichis à 2.6 % et de - 5.61 % pour les assemblages en périphérie. L'effet de damier est de 1.65 %.

Les deux cartes d'activités, obtenues à partir de ces deux calculs BILAN (BILUPS8) et (BILUPS8f), sont comparées, tableau (II.27). On observe des écarts moyens dans le coeur respectivement de -4.05 % et de 6.36 % pour les deux types d'assemblages, enrichis à 2.1 % et à 2.6 %. L'écart sur l'effet de damier s'élève à 10.41 % et l'écart moyen en périphérie à - 1.22 %.

On indique dans le tableau (II.28) et pour les assemblages figure II.2 les valeurs du flux moyen, gradient et flux au centre des assemblages.

Le passage d'un maillage (2 x 2) à un maillage plus fin (4 x 4) modifie les valeurs du flux au centre des assemblages. Les écarts entre les deux calculs sont de l'ordre de - 5 % en ce qui concerne les assemblages 1, 3 et 5 et respectivement de l'ordre de 9.2 %, 6.91 % et 1.04 % en ce qui concerne les assemblages 2, 4 et 6. Ces écarts sont imputables à la différence des valeurs des gradients entre les deux calculs et non à la différence des valeurs du flux moyen qui ne varie que de 0 % à 1 %.

Conclusion

De ces résultats on peut conclure que le calcul BILAN avec un maillage fin (BILUPS8f) nous permet d'acquérir de meilleurs résultats du calcul d'activité que le calcul BILAN (BILUPS8).

Les écarts en activités proviennent du fait que le gradient du flux est correctement calculé dans le cas du maillage fin et que par conséquent le flux au centre des assemblages l'est aussi.

				0.9616 -4.00	0.5219 -7.81		
			1.2421 -0.81	0.8961 0.25	0.7586 0.53	0.5078 -8.04	
		1.3203 5.53	1.0180 2.15	1.2671 1.63	0.9406 -1.22	0.7855 -5.58	
	1.2609 -0.13	1.0181 3.54	1.3164 0.27	1.0431 1.33	1.3328 3.71	0.8574 -2.42	0.5415 -8.61
Assemblage central →			1.2779 -0.71	0.9860 3.50	1.3594 1.33	1.1196 4.57	1.2720 1.50	0.7176 -2.05

C
$\frac{C}{E} - 1\%$

C : Calcul
E : Expérience

Tableau II.26 _ Carte d'activité (A_{PS8f}).

$$\text{Ecart} = \frac{A_{PS8}}{A_{PS8f}} - 1\%$$

				-3.02	-2.81		
			-4.21	4.82	0.88	-3.68	
		-3.81	7.15	-3.85	3.61	-2.93	
	-4.05	7.49	-4.04	7.05	-4.35	6.10	-4.56
Assemblage central →		-4.08	8.23	-4.00	6.26	-4.57	1.13

Tableau II.27 _ Ecart entre les cartes d'activités (A_{PS8}) et (A_{PS8f}).

Numéro de l'assemblage	Flux moyen	Gradient	Flux au centre
	Calcul BILUPS8 Calcul BILUPS8f Ecart $\left[\frac{BILUPS8}{BILUPS8f}-1\right]$	Calcul BILUPS8 Calcul BILUPS8f Ecart $\left[\frac{BILUPS8}{BILUPS8f}-1\right]$	Calcul BILUPS8 Calcul BILUPS8f Ecart $\left[\frac{BILUPS8}{BILUPS8f}-1\right]$
1	22.6899 22.6800 0.04	1.0063 1.0617 -5.22	22.833 24.08 -5.18
2	18.2437 17.9936 1.39	0.9996 0.9281 7.70	18.236 16.70 9.20
3	24.1500 24.2022 -0.22	1.0074 1.0590 -4.87	24.329 25.63 -5.08
4	20.984 20.8308 0.74	1.0231 0.9640 6.14	21.468 20.08 6.91
5	22.283 22.4963 -0.95	1.0154 1.0660 -4.74	22.627 23.98 -5.64
6	12.3140 12.4180 -0.84	1.0790 1.0589 1.89	13.287 13.15 1.04

Tableau II.28 _ Comparaison de résultats de deux calculs BILAN BILUPS8 et BILUPS8 f.

On note par contre, que le fait d'augmenter le nombre de mailles par assemblage, n'a pas d'influence sur la valeur du flux moyen.

II.2.4.3 - Conclusion

L'ensemble de ces résultats nous mène à la conclusion que le calcul du coeur aux éléments finis BILAN en utilisant

- les polynômes "paraboliques sans noeuds internes (PS8)" pour représenter le flux et
- le maillage (2 x 2) mailles par assemblage

nous permet d'obtenir des résultats moyennés sur les assemblages suffisamment corrects (flux, puissance, ...).

D'autre part, il en ressort que le calcul fin du flux dans l'assemblage, qui nécessite de calculer correctement le gradient du flux demande :

- soit d'augmenter le degré des polynômes d'interpolation du flux, l'approximation "cubique Lagrange (CL16)" étant nécessaire dans notre cas,
- soit d'augmenter le maillage de calcul, un maillage (4 x 4) mailles par assemblage donne de bons résultats.

Ainsi nous avions un choix possible entre un calcul de coeur BILAN utilisant des polynômes d'interpolation de haut degré (cubiques Lagrange, BILUCL16) et un calcul de coeur BILAN utilisant des polynômes de degré moindre mais avec un maillage plus fin (paraboliques sans noeuds internes-fin, BILUPS8f).

D'une part, ces deux calculs donnent des cartes d'activités suffisamment correctes par comparaison avec la carte expérimentale, tableaux (II.21) et (II.25) avec toutefois un effet de damier de 1.65 % dans le calcul BILAN fin (BILUPS8f).

D'autre part le coût du calcul (BILUPS8f), compte tenu du nombre élevé de points est d'un facteur 1.4 celui du calcul (BILUCL16).

Pour ces deux raisons, le calcul de coeur BILAN (BILUCL16) nous apparaît comme le meilleur choix pour notre schéma de calcul.

II.3 - INFLUENCE DU COUPLAGE THERMOHYDRAULIQUE ET DE L'EFFET 2D/3D SUR LE CALCUL D'ACTIVITE

II.3.1 - Influence du couplage thermohydraulique

Notons que pour établir la carte expérimentale d'activité, en début de vie, il a fallu faire fonctionner le réacteur à environ 5 % de sa puissance nominale (soit ∿ 138 MWth), tandis que notre calcul BILAN a été réalisé à puissance nulle.

C'est pourquoi nous avons superposé dans le tableau (II.29) l'effet de puissance (calculable à partir d'un couplage thermohydraulique tel que nous le présenterons au chapitre III) sur les valeurs d'activités calculées (A_{CL16}) du tableau (II.21).

Nous remarquons, de la comparaison des deux tableaux (II.21) et (II.29) que les valeurs des activités à 5 % PN n'ont pratiquement pas changé par rapport à celles des activités à puissance nulle. Ce qui montre qu'un niveau de puissance limité a un effet faible sur le calcul d'activité.

II.3.2 - Effet 2D/3D

Le calcul de coeur BILAN est effectué à deux dimensions, ce qui revient à négliger l'effet de la répartition axiale de puissance, le flux axial n'étant pas le même dans tous les assemblages.

Le tableau (II.30) nous donne les valeurs d'activités, du tableau (II.29), en tenant compte cette fois-ci de l'effet 2D/3D(*).

En tenant compte de la répartition axiale de puissance, nous réduisons l'écart moyen de 0.33 % à 0.35 % dans les assemblages enrichis à 2.1 %, de 1.75 % à 1.37 % dans les assemblages à 2.6 % et de - 5.61 % à -3.73 % dans les assemblages périphériques.

(*) Différences entre les valeurs d'activités calculées à trois dimensions et intégrées sur la hauteur et les valeurs d'activités calculées à deux dimensions.

				0.9654 -3.62	0.5223 -7.74		
			1.2462 -0.48	0.8908 -0.35	0.7568 0.29	0.509 -7.82	
		1.3259 5.98	1.0111 1.45	1.2722 2.04	0.9364 -1.66	0.7875 -5.34	
	1.2657 0.25	1.0108 2.80	1.3226 0.75	1.0366 0.70	1.3401 4.28	0.8505 -3.21	0.543 -8.35
Assemblage central →		1.2826 -0.34	0.979 2.76	1.3644 1.70	1.1147 4.11	1.2762 1.84	0.7166 -2.18

C
$\frac{C}{E}$ - 1%

C : Calcul
E : Expérience

Tableau II. 29 _ Carte d'activité (A_{CL16})
avec l'effet 5% PN.

				0.9757 -2.60	0.5349 -5.51		
			1.2413 -0.87	0.8923 -0.18	0.7653 1.42	0.5222 -5.43	
		1.3132 4.96	1.0038 0.72	1.2693 1.80	0.9408 -1.20	0.8009 -3.73	
	1.2490 -1.08	0.9987 1.57	1.3105 -0.18	1.0312 0.17	1.3411 4.36	0.8590 -2.24	0.5568 -6.03
Assemblage central →		1.2676 -1.51	0.9699 1.81	1.3570 -0.54	1.1142 4.06	1.2861 2.63	0.7308 -0.25

C
$\frac{C}{E}$ - 1%

C : Calcul
E : Expérience

Tableau II. 30 _ Carte d'activité (A_{CL16})
avec les effets 5% PN et 2D/3D.

II.4 - DISPERSION DES RESULTATS EXPERIMENTAUX

Nous avons remarqué que les résultats expérimentaux pour certains assemblages présentent des dispersions importantes :

- vis-à-vis des résultats obtenus sur d'autres assemblages comparables par leur nature et leur position dans le coeur. Les 50 valeurs expérimentales rabattues symétriquement sont données dans le tableau (II.31). On observe des écarts importants de mesures dans certains assemblages pouvant atteindre 6.7 % en A7 et 6 % en A8 et de l'ordre de 4 % en D7 ;

- vis-à-vis des résultats obtenus sur d'autres réacteurs : Nous avons représenté la carte d'activité expérimentale du réacteur Fessenheim 2 et celles des deux réacteurs Fessenheim 1 et Bugey 2 (tableau II.32). Bien que ces réacteurs soient de conception identique malgré de légères différences de bilan-matière (l'enrichissement des lots varie quelque peu autour de la valeur de conception, la température moyenne de référence diffère entre Fessenheim et Bugey), nous avons remarqué des écarts supérieurs à 3 % en début de vie entre les valeurs de l'activité dans 20 assemblages.

Il est donc nécessaire d'éliminer les points de mesures aberrants afin d'avoir une carte supprimant autant que possible les défauts de mesure.

Pour cela, nous avons calculé une carte d'activité moyenne sur les trois réacteurs, tableau (II.33) ; afin d'obtenir une carte d'activité définitive nous avons procédé à deux corrections :

- La carte d'activité, tableau (II.33), présente des valeurs d'activités différentes pour des assemblages présentant pourtant une symétrie dans le coeur. Nous éliminons cet effet de mesure en moyennant les valeurs d'activités, sur tous les assemblages symétriques. Nous obtenons ainsi une carte d'activité tableau (II.34).

- En comparant la carte d'activité, tableau (II.32), représentant les points de mesures des activités des trois réacteurs et la carte d'activité, tableau (II.34) des valeurs moyennes rabattues par symétrie, nous remarquons que dans dix assemblages, les écarts entre les points de mesures atteignent 3 %. Nous éliminons donc ces dix points, dont six appartenaient

au réacteur Fessenheim 2, tableau (II.35). D'ailleurs, dans le cas de Fessenheim 2 cette analyse est confirmée par l'interprétation des cartes d'activité des premiers pas d'évolution.

Après avoir ôté ces points aberrants nous sommes en possession d'une carte expérimentale corrigée d'activités, tableaux (II.36) et (II.37), dans laquelle nous avons réduit au mieux l'effet des erreurs de mesure.

Il nous reste à comparer la carte optimisée obtenue par le calcul BILAN (BILUCL16), tableau (II.21), avec la carte expérimentale corrigée, tableau (II.37). Les écarts figurent dans le tableau (II.38) :

- On note :

  . Des écarts moyens de 0.27 % dans les assemblages enrichis à 2.1 % et de 1.87 % dans les assemblages enrichis à 2.6 %.

  . Un écart moyen de - 4.76 % en périphérie.

- Nous soulignons que, le fait de moyenner les cartes de mesures des trois réacteurs, réduit les écarts calcul-expérience sur tous les points de mesure et la suppression de six points de mesure de Fessenheim 2 [R8, J15, G14, J3, D10 et F6](*) a une influence particulière sur les écarts calcul-expérience de ces mêmes points. Ces écarts s'élèvent à - 3.37 %, - 7.34 %, - 1.27 %, 1.59 %, 0.16 % et - 0.08 % au lieu de - 2.13 %, - 8.35 %, - 3.04 %, 4.27 %, 2.02 % et 5.91 % dans le tableau (II.21).

La carte d'activité qui tient compte de l'effet de 5 % de puissance et de l'effet 2D/3D, tableau (II.30), a été aussi comparée avec la carte expérimentale corrigée, tableau (II.37).

Les écarts sont donnés dans le tableau (II.39).

(*)Les points R8/A8, J15/A7, G14/B7, J3/C7 et D6/D10 sont symétriques.

- On constate :

  . Des écarts moyens de - 0.22 % dans les assemblages enrichis à 2.1 % et de 1.5 % dans les assemblages enrichis à 2.6 %.

  . Un écart moyen de - 2.87 % en périphérie.

	H	G	F	E	D	C	B	A
4					1.0017	0.5597 0.5599 0.5704 0.5744		
5				1.2215 1.2596 1.2636 1.2640	0.8811 0.9067	0.7546	0.5468 0.5576	
6			1.2511	0.9901 1.0030	1.1991 1.2945	0.9353 0.9690	0.8168 0.8470	
7		1.2344 1.2723 1.2810	0.9720 0.9946	1.3057 1.3199	1.0102 1.0485	1.2639 1.3062	0.8632 0.8942	0.5732 0.6118
8	Assemblage central →		1.2652 1.3087	0.9388 0.9665	1.3416	1.0556 1.0683 1.0735 1.0853	1.2532	0.7103 0.7548

Tableau II. 31 _ Carte de valeurs expérimentales d'activité rabattues par symétrie.

							0.755 0.757 *0.725							
									*0.846 0.833 0.808					
			0.570 0.543 *0.553			1.264 1.325 *1.308	1.073 1.078 1.055				0.574 0.566 0.560			
				0.881 0.864 0.877			1.340 1.363 1.352		1.293 1.248 *1.264					
		0.755 0.740 0.734		1.221 1.247 1.228		1.319 1.311 1.322				1.265 1.244 1.233	0.906 0.875 *0.889		0.546 0.547 0.534	
				0.991 0.970 0.993			1.308 1.252 *1.294		1.255 1.331 *1.321					
		1.306 1.337 1.316				1.235 1.233 *1.285		1.273 1.246 *1.290			1.010 1.030 1.032		0.863 0.858 0.843	
0.710 0.752 *0.719		1.069 1.059 1.055		0.966 0.950 0.969					1.265 1.267 1.300			1.057 1.065 1.060	1.257 1.311 *1.249	
				1.306 1.335 1.322				1.279 1.232 *1.286	0.971 0.979 *1.004					0.574 0.593 *0.564
		0.935 0.926 0.917				0.995 0.990 1.018					1.199 1.270 *1.269		0.816 0.828 0.797	
				1.264 1.228 1.244			0.908 0.965 *0.976		1.003 0.990 1.011	1.259 1.243 1.262				
		0.559 0.555 0.557				1.049 1.009 *1.040					1.002 1.019 0.990	0.560 0.564 0.561		
							1.086 1.100 1.071		0.968 0.961 0.950					
				0.558 0.538 *0.543				0.894 0.879 0.870						
						0.612 0.596 *0.585								

x Valeur FSH2
x Valeur FSH1
x Valeur BG2

* Assemblage avec un écart > 3% entre deux valeurs d'activité

TABLEAU II.32 - CARTES EXPÉRIMENTALES D'ACTIVITES DE TROIS RÉACTEURS FESS 1, FESS 2 ET BUG 2.

R	P	N	M	L	K	J	H	G	F	E	D	C	B	A	
							0.746								1
									0.829						2
			0.555			1.299	1.069				0.567				3
				0.874			1.352		1.269						4
		0.743		1.232		1.317				1.247	0.890		0.542		5
				0.985			1.271		1.302						6
		1.320				1.251		1.270			1.024		0.855		7
0.727		1.061		0.962					1.277			1.061	1.272		8
				1.321				1.266	0.985					0.577	9
		0.926				1.001					1.246		0.814		10
				1.245			0.960		1.001	1.255					11
		0.557				1.033					1.004	0.562			12
							1.086		0.960						13
				0.546				0.881							14
						0.598									15

Tableau II.33 _ Carte d'activité moyenne sur les trois réacteurs FESS 1, FESS 2 et BUG 2.

	R	P	N	M	L	K	J	H	G	F	E	D	C	B	A
1								0.736							
2										0.822					
3				0.560			1.310	1.078				0.560			
4					0.882			1.352		1.258					
5			0.743		1.245		1.319				1.245	0.882		0.544	
6					0.993			1.274		1.302					
7			1.310				1.262		1.262			1.029		0.868	
8	0.736		1.061		0.961					1.274			1.061	1.272	
9					1.319				1.262	0.993					0.587
10			0.943				0.993					1.258		0.822	
11					1.245			0.961		0.993	1.245				
12			0.560				1.029					1.004	0.560		
13								1.078		0.943					
14					0.544				0.868						
15							0.587								

Tableau II. 34 _ Carte d'activité moyenne rabattue par symétrie.

	R	P	N	M	L	K				F	E	D	C	B	A
1								0.755 0.757 0.725							
2										0.846 0.833 0.808					
3				0.570 0.543 0.553			1.264 1.325 1.308	1.073 1.078 1.055				0.574 0.566 0.560			
4					0.881 0.864 0.877			1.340 1.363 1.352		1.293 1.248 1.264					
5			0.755 0.740 0.734		1.221 1.247 1.228		1.319 1.311 1.322				1.265 1.244 1.233	0.906 0.875 0.889		0.546 0.547 0.534	
6					0.991 0.970 0.993			1.308 1.252 1.294		1.255 1.331 1.321					
7			1.306 1.337 1.316				1.235 1.233 1.285		1.273 1.246 1.290			1.010 1.030 1.032		0.863 0.858 0.843	
8	0.710 0.752 0.719		1.069 1.059 1.055		0.966 0.950 0.969					1.265 1.267 1.300			1.057 1.065 1.060	1.257 1.311 1.249	
9					1.306 1.335 1.322				1.279 1.232 1.286	0.971 0.979 1.004					0.574 0.593 0.564
10			0.935 0.926 0.917				0.995 0.990 1.018					1.199 1.270 1.269		0.816 0.828 0.797	
11					1.264 1.228 1.244			0.908 0.965 0.976		1.003 0.990 1.011	1.259 1.243 1.262				
12			0.559 0.555 0.557				1.049 1.009 1.040					1.002 1.019 0.990	0.560 0.564 0.561		
13								1.086 1.100 1.071		0.968 0.961 0.950					
14					0.558 0.538 0.543				0.894 0.879 0.870						
15							0.612 0.596 0.585								

Tableau II.35 - Points de mesures ôtés

	R	P	N	M	L	K	J	H	G	F	E	D	C	B	A
1								0.742							
2										0.821					
3				0.562			1.319	1.078				0.562			
4					0.882			1.352		1.270					
5			0.743		1.245		1.319				1.245	0.882		0.544	
6					0.993			1.274		1.326					
7			1.319				1.262		1.262			1.029		0.863	
8	0.742		1.061		0.961					1.274			1.061	1.253	
9					1.319				1.262	0.993					0.586
10			0.943				0.993					1.270		0.821	
11					1.245			0.961		0.993	1.245				
12			0.562				1.029					1.004	0.562		
13								1.078		0.943					
14					0.544				0.863						
15							0.586								

Tableau II. 36 _ Carte expérimentale d'activité corrigée.

	H	G	F	E	D	C	B	A
4					1.004	0.562		
5				1.245	0.882	0.743	0.544	
6			1.326	0.993	1.270	0.943	0.821	
7		1.262	0.993	1.319	1.029	1.319	0.863	0.586
8	(Assemblage central →)		1.274	0.961	1.352	1.070	1.253	0.742

Tableau II.37 _ Carte expérimentale d'activité corrigée rabattue par symétrie.

	H	G	F	E	D	C	B	A
4					-3.88	-7.12		
5				0.08	1.02	1.88	-6.43	
6			-0.08	1.81	0.16	-0.64	-4.02	
7		0.32	1.81	0.15	0.78	1.59	-1.27	-7.34
8	(Assemblage central →)		0.63	1.77	0.89	4.21	1.92	-3.37

$$\text{Ecart} = \frac{A_{CL16}}{E} - 1\%$$

Tableau II.38 _ Ecart entre la carte d'activité (A_{CL16}) et la carte expérimentale corrigée.

	H	G	F	E	D	C	B	A	
					-2.82	-4.82			4
				-0.30	1.17	3.00	-4.01		5
			-0.96	1.09	-0.06	-0.23	-2.45		6
		-1.03	0.57	-0.64	0.21	1.68	-0.46	-4.98	7
Assemblage central →			-0.50	0.93	0.37	4.13	2.64	-1.51	8

C

$\frac{C}{E} - 1\%$

Tableau II.39 _ Ecart entre la carte d'activité (A_{CL16}) corrigée pour l'effet 5 % PN et 2D/3D et la carte expérimentale corrigée.

II.5 - ETUDES COMPLEMENTAIRES

Nous avons étudié la sensibilité des distributions de puissance et d'activités dans le coeur en fonction de deux paramètres :

- Prise en compte des variations du spectre dans les assemblages périphériques, lors du calcul des constantes homogènes de ces assemblages.

- Constantes de réflecteur.

II.5.1 - Effet de variation du spectre dans les assemblages périphériques

Les écarts particuliers calcul-expérience, dans les assemblages périphériques qui s'élèvent à - 5.61 % [tableau (II.21)], nous ont conduit à calculer les constantes homogènes de ces assemblages par un calcul de traverse dans lequel nous avons représenté l'assemblage 3.1 % par un isotope HOMOGE au voisinage du réflecteur.

Le calcul du coeur BILAN (BILUCL16) a été de nouveau réalisé en remplaçant les constantes des assemblages périphériques, calculées par le calcul APOLLO en milieu infini, par les constantes issues du calcul APOLLO traverse ; soit (BILUCL16TR).

Les valeurs d'activités (A_{CL16TR}) sont indiquées dans le tableau (II.40).

- On remarque :

  . Des écarts moyens de 0.62 % dans les assemblages enrichis à 2.1 % et de 1.52 % dans les assemblages enrichis à 2.6 %.

  . L'écart moyen en périphérie est de - 4.42 %.

- Le fait de prendre en considération la variation du spectre dans les assemblages périphériques pour calculer les constantes homogènes influe sur les résultats du calcul d'activité où l'écart moyen en périphérie a diminué de 1.20 %.

II.5.2 - Effet de constantes de réflecteur sur les résultats du calcul

Les constantes de réflecteur introduites dans le calcul de diffusion peuvent avoir une influence sur les résultats. Elles agissent sur la distribution de puissance et par conséquent sur la distribution des burn-up.

La représentation du réflecteur, dans le calcul de coeur en diffusion est faite par quelques paramètres neutroniques, tel que le coefficient de diffusion D, la section efficace macroscopique d'absorption, Σ_a et la section efficace macroscopique de transfert des neutrons, d'un groupe à un autre, Σ_R.

Dans le cas où le réacteur est entouré d'un baffle, on trouve deux interfaces distinctes : l'interface coeur-baffle et l'interface baffle-réflecteur. On peut alors calculer les constantes d'un milieu fictif, homogène, dit réflecteur équivalent, qui remplace dans le calcul de diffusion la représentation réelle du système baffle + réflecteur. Notons que la représentation explicite de ces deux milieux baffle et réflecteur, n'est pas toujours très souhaitable ni facile à réaliser dans les divers calculs de projets.

Afin de voir l'influence de l'homogénéisation des constantes de réflecteur sur les résultats du calcul de coeur, nous avons utilisé deux méthodes différentes de calcul de ces constantes homogènes de réflecteur équivalent [20, 21].

Les deux méthodes, l'une faite par NISAN S. et REUSS P. [20], l'autre par LEBIGOT Ch. et LEFEBVRE J.C. [21] sont basées sur un calcul initial à une dimension avec le code de transport APOLLO dans lequel on représente l'assemblage périphérique du coeur par un milieu homogène. Chacune des méthodes résout analytiquement l'équation de la diffusion, mais avec les différences suivantes :

- . La méthode REUSS-NISAN considère le réflecteur réel et ses constantes neutroniques par zone pour calculer les albédos et les combiner pour avoir les albédos de l'ensemble baffle + réflecteur.

  . Cette méthode prend comme coefficient de diffusion du réflecteur équivalent homogène et infini ceux de la zone adjacente au combustible (baffle) supposée en milieu infini, le gradient de flux entrant est donc conservé.

  . On introduit dans le code REFLEC les coefficients de diffusion et les constantes macroscopiques d'absorption et de transfert fournies par zone par le calcul de transport, en précisant l'épaisseur du baffle. Le code donne directement les paramètres neutroniques D_1, D_2, Σ_{a_1}, Σ_{a_2}, et Σ_r caractérisant le réflecteur équivalent tel qu'il ait les mêmes albédos que l'ensemble baffle + réflecteur.

- . La méthode LEFEVRE détermine les constantes homogènes en conservant directement les flux et les courants à l'interface qui sont liés entre eux par les relations :

$$\frac{J_1}{\phi_1} = \frac{D_1}{L_1}$$

$$\frac{J_2}{\phi_2} = \frac{-\Sigma_r}{\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2}} + \frac{D_2}{L_2}\,\frac{\phi_2}{\phi_1} \quad \text{pente } a = \frac{D_2}{L_2}$$

  Il suffit de faire varier le rapport $\frac{\phi_2}{\phi_1}$ en agissant sur la zone combustible pour connaître tous les paramètres.

  . Les coefficients de diffusion sont ceux du milieu combustible, ce qui impose la continuité de la dérivée du flux à l'entrée.

Le calcul du coeur BILAN a été réalisé :

- Une première fois avec les constantes homogènes issues de la méthode REUSS-NISAN ; c'est (BILUCL16) pour lequel nous avons représenté les résultats en (II.2.4.1).

- Une seconde fois avec les constantes homogènes de LEBIGOT-LEFEBVRE, c'est (BILUCL16R). Les valeurs d'activités calculées (A_{CL16R}) ainsi que les écarts calcul-expérience sont indiqués dans le tableau (II.41).

Résultats :

- Les constantes homogènes de réflecteur sont donnés dans le tableau (II.42), pour la même température d'eau 286°C (coeur chaud, puissance nulle) et la concentration en bore critique de 1330 ppm.

- Les valeurs propres des deux calculs de coeur sont identiques, tableau (II.43).

- Les valeurs des deux cartes d'activités (A_{CL16}) et (A_{CL16R}) sont très proches, ce qui apparaît clairement dans le tableau (II.44) où nous avons comparé directement ces deux cartes d'activités. On note des écarts inférieurs à 1 %.

Les tableaux (II.21) et (II.41) permettent une comparaison calcul-expérience, on constate un écart moyen de 0.93 % dans les assemblages enrichis à 2.1 % pour les deux cas, des écarts moyens de 1.75 % pour un cas et de 1.73 % pour l'autre cas dans les assemblages enrichis à 2.6 % et des écarts moyens en périphérique de - 5.61 % et - 5.43 %.

- La comparaison des deux cartes de puissance issues des deux calculs de coeur est montrée dans le tableau (II.45). Nous observons des écarts inférieurs à 1 %.

Conclusion :

Le calcul des constantes homogènes de réflecteur équivalent soit par la méthode NISAN-REUSS, soit par la méthode LEBIGOT-LEFEVRE, conduit aux mêmes résultats.

Les deux méthodes ne font pas les mêmes hypothèses sur les coefficients de diffusion D_1 et D_2 ce qui donne des valeurs différentes pour les sections d'absorption Σ_{a_1} et Σ_{a_2} et la section de transfert Σ_r, mais le fait qu'elles conduisent au même rapport $\frac{D}{L}$ entre le coefficient de diffusion et la longueur de diffusion dans le réflecteur équivalent (écart inférieur à 2 %) explique la similarité de résultats.

				0.9645 -3.71	0.5292 -6.52		
			1.2433 -0.71	0.8909 -0.34	0.7581 0.46	0.5171 -6.36	
		1.3182 5.36	1.0075 1.09	1.2689 1.77	0.9381 -1.48	0.7987 -3.99	
	1.2576 -0.40	1.0051 2.22	1.3156 0.21	1.0341 0.46	1.3392 4.21	0.8548 -2.72	0.5520 -6.84
Assemblage central →		1.2748 -0.95	0.9739 2.23	1.3622 1.54	1.1134 3.99	1.2807 2.19	0.7292 -0.46

C
$\frac{C}{E} - 1\%$

C : Calcul
E : Expérience

Tableau II. 40 _ Carte d'activité (A_{CL16TR}).

				0.9689 -3.27	0.5285 -6.64		
			1.2484 -0.30	0.8933 -0.07	0.7594 0.64	0.5108 -7.50	
		1.3244 5.86	1.0116 1.51	1.2721 2.03	0.9379 -1.50	0.7877 -5.31	
	1.2648 0.17	1.0107 2.79	1.3210 0.62	1.0366 0.70	1.3375 4.08	0.8508 -3.18	0.5426 -8.42
Assemblage central →		1.2815 -0.43	0.9778 2.63	1.3633 1.62	1.1121 3.87	1.2728 1.56	0.7081 -3.34

C
$\frac{C}{E} - 1\%$

C : Calcul
E : Expérience

Tableau II. 41 _ Carte d'activité (A_{CL16R}).

	D_1	D_2	Σ_{a1}	Σ_{a2}	Σ_r
Méthode REUSS / NISAN	0.9045	0.3510	0.01842	0.12058	0.00897
Méthode LEBIGOT/LEFEVRE	1.3123	0.3858	0.011795	0.11225	0.007981

Tableau II. 42 _ Constantes de réflecteur équivalent.

Calcul BILAN	Valeur propre
BILUCL16	0.99916
BILUCL16R	0.99919 (3 pcm)

Tableau II.43 _ Comparaison de valeurs propres de deux calculs BILAN : (BILUCL16) et (BILUCL16R).

$$\text{Ecart} = \frac{A_{CL16R}}{A_{CL16}} - 1\,\%$$

					0.40	1.25		
				0.19	0.26	0.32	0.35	
			-0.05	0.06	0.01	0.10	-0.04	
		-0.09	-0.03	0.00	-0.04	-0.19	-0.14	-0.07
Assemblage central →			-0.04	-0.02	-0.05	-0.26	-0.33	-1.24

Tableau II.44 _ Comparaison de deux cartes d'activités (A_{CL16}) et (A_{CL16R}).

$$\text{Ecart} = \frac{P_{CL16R}}{P_{CL16}} - 1\,\%$$

					0.44	1.07		
				0.09	0.18	0.26	0.29	
			0.00	0.00	0.00	0.10	0.06	
		-0.18	-0.09	-0.09	-0.09	-0.09	-0.19	-0.22
Assemblage central →	-0.19	-0.10	-0.09	-0.09	-0.08	-0.16	-0.27	-1.18

Tableau II.45 _ Comparaison de deux cartes de puissance de calcul BILAN, (BILUCL16) et (BILUCL16R).

CONCLUSION

Dans ce chapitre nous nous sommes attachés à mettre en oeuvre un schéma de calcul pour le traitement en début de vie du réacteur FESSENHEIM.

Nous avons retenu le schéma suivant :

- Un calcul d'assemblage en théorie de transport, en utilisant le module multicellule classique fondé sur l'approximation ROTH du programme APOLLO.

- Un calcul de diffusion à deux dimensions traitant le coeur entier en utilisant le programme BILAN basé sur la méthode des éléments finis.

La confrontation entre les résultats calculés et les résultats expérimentaux [taux de réaction de fission ; activité] fait ressortir

- Au niveau du calcul de transport, l'influence de la représentation de la lame d'eau entre assemblages sur la valeur de la réactivité (les écarts sont de 83 à - 119 pcm selon l'enrichissement et le nombre de crayons de poison consommable) et l'influence de la prise en compte de la chambre de fission dans la cellule centrale ; le calcul de la section efficace de fission de l'^{235}U, en omettant la présence de la chambre de fission introduit une erreur variable de 21 % à 24 % selon l'assemblage sur le calcul de cette section et par conséquent entraîne un écart relatif de l'ordre de 1 % sur les activités obtenues à partir de cette même section.

- Au niveau du calcul de coeur en diffusion, qui peut s'effectuer sans représenter explicitement la chambre de fission dans les cellules centrales à condition que l'on tienne compte de la perturbation liée à la présence de cette chambre de fission pour calculer les activités.

Le choix du degré des polynômes d'interpolation du flux n'a pas d'influence sur le calcul du flux moyen dans les assemblages, par contre, il a un effet important sur le calcul du gradient du flux et par là, sur le calcul du flux en certains points de l'assemblage.

Le passage d'un maillage grossier (2 x 2) à un maillage plus fin (4 x 4), n'a lui aussi, aucun effet sur le flux moyen dans les assemblages, mais en modifiant les valeurs du gradient de flux, influe sur les valeurs du flux au centre des assemblages.

Ceci nous conduit à effectuer les calculs multicellules APOLLO sur les assemblages sans représenter explicitement les chambres de fission, puis à réaliser le calcul de coeur BILAN en utilisant les polynômes d'interpolation du flux "Cubique Lagrange" et un maillage (2 x 2) par assemblages.

Les activités seront calculées à partir du flux au centre de chaque assemblage issu de ce calcul BILAN et de la section efficace de fission de l'^{235}U dans la chambre de fission fourni par la sortie homogène (sortie 100) d'un calcul APOLLO. Pour tenir compte de la perturbation du flux microscopique due à la présence de la chambre de fission dans l'assemblage, ce calcul de transport APOLLO aura été effectué en présence de celle-ci.

Ce schéma de calcul nous conduit à l'obtention de résultats satisfaisants.

L'écart moyen dans les assemblages enrichis à 2.1 % s'élève à 0.93 % et à 1.75 % dans ceux enrichis à 2.6 %. L'effet de damier est presque inexistant quant à l'écart moyen dans les assemblages périphériques, il est de l'ordre de - 5.61 %, tableau (II.21).

La carte d'activité calculée a ensuite été corrigée par l'effet du couplage thermohydraulique et par l'effet 2D/3D.

La carte expérimentale d'activité a été obtenue pour le réacteur fonctionnant à 5 % de sa puissance nominale (138 MWth) et la carte calculée d'activité est établie par un calcul à puissance nulle. Cette différence n'a que très peu d'influence sur les valeurs des activités, tableau (II.29).

L'effet 2D/3D, qui revient à prendre en compte la répartition axiale de puissance a par contre un effet sur les valeurs des activités. Les écarts moyens diminuent et se réduisent à 0.35 % dans les assemblages enrichis à 2.1 % et à 1.37 % dans les assemblages enrichis à 2.6 %. L'écart moyen en périphérie n'est plus que de - 3.73 %, tableau (II.30).

Notre étude a été complétée par l'étude de l'influence de deux effets : celui dû aux variations du spectre dans les assemblages périphériques adjacents au réflecteur et celui dû aux différentes méthodes possibles de calcul des constantes de ce réflecteur.

Les constantes neutroniques homogènes issues d'un calcul multicellule d'assemblage introduites dans le calcul de diffusion ont été remplacées pour les assemblages périphériques par un calcul APOLLO traverse. L'effet de spectre n'est pas négligeable et sa prise en compte réduit les écarts moyens de tableau (II.21) à 0.62 % et à 1.52 % dans les assemblages centraux et à - 4.42 % dans les assemblages en périphériques, tableau (II.40).

Le calcul des constantes de réflecteur par les méthodes de NISAN-REUSS et LEBIGOT-LEFEBVRE bien que ne faisant pas les mêmes hypothèses, nous conduit à l'obtention de résultats très similaires en ce qui concerne le calcul de diffusion du coeur.

En ce qui concerne la carte expérimentale d'activité, nous nous sommes efforcés de supprimer autant que possible les défauts de mesure en respectant les symétries du réacteur. Nous avons réduit ainsi les écarts calcul-expérience sur tous les points de mesure et nous constatons que l'écart moyen n'est plus que de - 0.22 % et 1.5 % dans les assemblages respectivement enrichis à 2.1 % et 2.6 % et de - 2.87 % dans les assemblages périphériques.

Il résulte de cette étude, que l'adoption du schéma de calcul suivant

- obtention des constantes neutroniques des assemblages par un calcul de transport multicellule sans représentation explicite des chambres de fission, avec certaines hypothèses ;

- calcul du coeur par une méthode aux éléments finis, utilisant des polynômes "cubiques Lagrange" et un maillage assez grossier (2 x 2) ;

- prise en compte de l'effet 2D/3D de répartition axiale de puissance.

nous permet d'atteindre l'objectif fixé en début de ce chapitre, c'est-à-dire l'obtention d'un schéma optimisé, tant du point de vue de la précision recherchée, que du point de vue du coût de calcul, nous permettant aussi bien le calcul en début de vie qu'en évolution des activités du réacteur FESSENHEIM.

CHAPITRE III

SUIVI ET INTERPRETATION DE L'EVOLUTION DU PREMIER CYCLE

INTRODUCTION

Pour le calcul de l'évolution du premier cycle nous adopterons la même philosophie que lors du calcul sans évolution effectué au chapitre précédent.

Le calcul en évolution du réacteur complet en théorie de la diffusion, nécessite l'obtention de bibliothèques évolutives de constantes neutroniques.

Nous utiliserons des bibliothèques évolutives à variations [22], qui permettent de prendre en compte les contre-réactions (effet Doppler, dû au changement de température du combustible, et effet dû à la variation de la température du modérateur). Ces bibliothèques proviennent de calculs multicellules en évolution par le code de transport APOLLO pour chaque type d'assemblage et divers paramètres (température du combustible, densité et température du modérateur).

Comme précédemment, les calculs de diffusion du réacteur, seront effectués à l'aide de la méthode aux éléments finis, module ELECTRE de la version 0.2 du système NEPTUNE ; soit par le module BILAN pour le calcul à deux dimensions sans contre-réactions, soit par le module CRONOS pour le calcul à deux dimensions tenant compte des contre-réactions donc du couplage neutronique-thermohydraulique. Ces deux calculs nous permettront d'évaluer l'effet dû aux contre-réactions sur divers paramètres (dérives de réactivités, distribution radiale de puissance, distribution d'activité condensée axialement et taux de combustion).

Ensuite, nous approfondirons les calculs sur le premier cycle par certaines études complémentaires :

- Test d'une représentation plus fine de couplage thermohydraulique dans des zones de fort gradient de distribution de puissance.
- Evaluation de l'effet d'une erreur éventuelle sur l'efficacité des grappes de poison consommable.
- Effet de l'ajustement de constantes de réflecteur en cours de cycle sur les résultats de calcul.

Le calcul de coeur en début de cycle sera repris à trois dimensions avec contre-réactions par le module CRONOS permettant, l'enchaînement du calcul de diffusion à trois dimensions TRIDENT et de calculs thermohydrauliques effectués par FLICA III. Ce calcul nous permettra d'examiner la distribution axiale d'activité et d'évaluer l'effet dû à la prise en compte de la description axiale du coeur en début de cycle.

En dernier lieu, nous définirons un schéma de calcul de gestion, tridimensionnel avec couplage thermohydraulique, valable aux cycles ultérieurs, à partir des analyses à deux dimensions, sur toute la durée du cycle, et à trois dimensions, uniquement pour des raisons de coût de calculs, en début de vie pour le coeur neuf.

III.1 - PRINCIPE DE LA METHODE DE CREATION DES BIBLIOTHEQUES.

III.1.1 - Exposé du problème.

Dans le premier coeur du réacteur FESSENHEIM, on se trouve en présence d'un nombre de bibliothèques différentes assez important, neuf exactement. Pour chacun de ces assemblages, il faut construire une bibliothèque évolutive tenant compte des effets de contre-réactions de températures (effet Doppler et effet de température de modérateur).
On désire paramétrer les bibliothèques en fonction du taux de combustion (τ), de cinq températures d'eau (T_m) et de cinq températures de combustibles (T_c). Ceci demande un nombre important de calculs d'assemblage en transport (APOLLO) et le coût des bibliothèques devient très supérieur au coût des calculs de coeur effectués par la suite. C'est la raison pour laquelle il a été recherché la plus grande simplification possible dans le calcul des effets de contre-réaction , qui permette un coût minimum de calcul sans perdre beaucoup de précision.

III.1.2 - Simplifications utilisées lors du calcul des contre-réactions.

Pour chaque type d'assemblage et pour chaque taux de combustion (τ) on doit construire une bibliothèque paramétrée en fonction des deux températures (T_m) et (T_c).

T_m (°C) / T_c (°C)	200	286	306	320	340
200	×	×	×	×	×
286	×	×	×	×	×
650	×	×	×	×	×
850	×	×	×	×	×
1500	×	×	×	×	×

Pour avoir ces bibliothèques deux approximations ont été faites :

a) <u>On découple les effets de température du modérateur et de température du combustible</u>

Cela revient à n'effectuer le calcul des sections efficaces que dans certaines conditions, en fixant l'une des températures nominales (*) ($\bar{T}_m$ ou $\bar{T}_c$) et en faisant varier l'autre, nous obtenons les valeurs de sections efficaces de "la croix" (telle qu'elle figure dans le schéma ci-dessus).

On reconstitue ensuite les jeux de sections en admettant que les effets modérateur et Doppler sont découplés, ce qui permet d'obtenir les autres valeurs et de compléter la matrice à un taux de combustion donné.

Ainsi donc, à chaque pas d'évolution (τ_k) on fait 9 calculs de transport (pour obtenir les valeurs de la croix) au lieu de 25 (dans notre cas).

b) <u>On considère que les effets des contre-réactions sur les sections microscopiques sont les mêmes quel que soit le taux de combustion</u>

Cela revient à n'effectuer le calcul de contre-réaction qu'au seul taux de combustion moyen de 12 000 MWj/T et à reporter ces effets à tous les pas d'évolution ; ce qui permet d'obtenir les valeurs des sections efficaces de "la croix", à chaque valeur de taux de combustion (τ_k) à partir des valeurs nominales de ce même taux de combustion (τ_k).

III.1.3 - Principe du calcul des contre-réactions

Pour chaque type d'assemblage, il nous faut une table de sections efficaces à 2 groupes fonction du taux d'irradiation (τ) et dépendant de deux paramètres : la température du combustible (T_c) et la température d'eau (T_m), afin de tenir compte des contre-réactions liées à la puissance.

(*) Températures nominales (306°C et 550°C).

Ce type de sections efficaces homogénéisées sur l'assemblage est adapté aux calculs de coeur aux éléments finis.

La création des bibliothèques nécessite plusieurs étapes qui sont les suivantes :

a - Calcul d'évolution APOLLO multicellule sur l'assemblage à 99 groupes aux conditions nominales (306°C, 650°C).

b - A 12 000 MWj/T, calcul APOLLO multicellule en reprise aux différentes températures choisies (5 T_e, 5 T_c) à partir des concentrations des noyaux lourds et des produits de fission issus de l'évolution. Nous avons donc, 9 bibliothèques qui constituent "la croix" à 12 000 MWj/T, la bibliothèque nominale sert de référence et toutes les autres seront construites à partir d'elle.

c - A 12 000 MWj/T, à partir de ces 9 bibliothèques on calcule l'effet des contre-réactions sur les valeurs de sections efficaces microscopiques ($\Delta\sigma$) de tous les corps évoluants ainsi que toutes les sections macroscopiques ($\Delta\Sigma$) des autres isotopes.

d - A partir de l'évolution aux conditions nominales à chaque pas d'irradiation (τ_k) et des ($\Delta\sigma$) et des ($\Delta\Sigma$) calculées ci-dessus, on constitue les 9 bibliothèques évolutives.

e - Construction de la matrice complète en considérant les effets modérateur et combustible découplés. On obtient ainsi 25 bibliothèques évolutives définies par :

$$\Sigma\ (\tau_{kl},\ T_c,\ T_m),$$

l varie de 0 à une valeur de taux de combustion différente selon l'assemblage.

f - Les NEPLIB évolutives sont ensuite classées par le code TRISYNTHESE [23], on obtient donc les NEPLIB définies par :

$\Sigma(\tau_{kl})$, T_{ci}, $N_{mJ})^{(*)}$ (i = 1,5 ; J = 1,5),

entre lesquelles s'effectuera l'interpolation pour le calcul du coeur.

Le bore, le xénon et le samarium sont associés à chaque NEPLIB comme tables supplémentaires ; ce sont les tables de sections microscopiques.

Les sections d'activation rapide et thermique de l'^{235}U : σ_{f_1} et σ_{f_2}, dans la chambre de fission ont été ajoutées comme tables supplémentaires aux sections microscopiques dans chaque NEPLIB.

Ces sections ont été obtenues comme suit , à partir de

- Calcul multicellule APOLLO en reprise aux conditions nominales ($\overline{T}_c$ = 650°C et $\overline{T}_m$ = 306°C) pour les taux de combustion suivants :

. 12 000 MWj/T pour tous les assemblages

. 0 MWj/T pour les assemblages 3.1 % sans poison, 3.1 % à 12 et 16 crayons de poison et 2.6 % à 20 crayons de poison.

dans lesquels la chambre de fission a été représentée, afin de déterminer l'effet du taux de combustion sur les valeurs des sections d'activation σ_{f_1} et σ_{f_2} pour chaque assemblage.

Le fait que l'effet soit linéaire, indépendant de l'enrichissement mais dépendant de l'empoisonnement nous permet d'obtenir pour chaque type d'assemblage, les valeurs des sections σ_{f_1} et σ_{f_2}, aux conditions nominales ($\overline{T}_c$ et $\overline{T}_m$) pour toute valeur d'irradiation, à partir de l'évolution aux conditions nominales, au taux moyen d'irradiation de 12 000 MWj/T.

(*) N_{mJ} définie par : la densité de l'eau × $\frac{V_{H_2O}}{V_t}$, est la densité apparente de l'eau, correspond à la température T_m.

V_{H_2O} est le volume occupé par H_2O.

V_t est le volume total de l'assemblage.

- Calcul multicellule APOLLO en reprise au taux moyen de 12 000 MWj/T pour l'assemblage 3.1 % sans poison, avec chambre de fission, en changeant la température du modérateur $\overline{T}_m$, de 306° à 286°C, la température de combustible restant inchangée.

Ce calcul, par comparaison avec le calcul-reprise à 12 000 MWj/T aux conditions nominales, précédemment cité, nous permet de déterminer l'effet de température du modérateur sur les sections d'activation σ_{f_1} et σ_{f_2} pour l'assemblage 3.1 % sans poison.

L'effet de température du modérateur étant linéaire, indépendant du taux de combustion, de l'enrichissement et de l'empoisonnement, nous obtenons σ_{f_1} et σ_{f_2} à toute température T_m de "la croix" (200°C, 286°C, 320°C, 340°C) pour tout assemblage et tout taux de combustion.

Les sections d'activation sont indépendantes de la température du combustible T_c.

Ainsi, nous pouvons obtenir les 9 bibliothèques évolutives de tous les assemblages et ensuite la matrice complète.

III.1.4 - Quelques données des calculs d'assemblage

- Le calcul d'assemblage a été effectué par le calcul APOLLO multicellule, modèle ROTH, à 5 ou 8 cellules et à 99 groupes. Les chambres de fission sont représentées seulement dans certaines reprises pour avoir les sections d'activation ; dans ce cas le calcul a été effectué à 8 ou 11 cellules.

- La chaîne utilisée comporte 19 noyaux lourds évoluants dont 5 sont fissiles.

- Les ajustements standard de l'^{235}U, l'^{242}Pu et l'élargissement Doppler du ^{240}Pu ont été effectués, le ν du ^{239}Pu a été augmenté d'un facteur 0,63 % ; les CM42 et CM43 ont été ajustés.

- Il a été utilisé l'isotope 100238 de l'^{238}U ; évaluation faite par H. TELLIER [24].

  L'origine des isotopes et les ajustements effectués peuvent être identifiés sur la bibliothèque APOLLIB à l'aide de la liste fournie en annexe.

- Le calcul de l'autoprotection des corps ^{235}U et ^{238}U est effectué par BIEFF à partir du calcul de la section équivalente (SEQUI) et de la détermination par JEZABEL du facteur de BELL.

- La concentration moyenne en bore pour les calculs d'évolution a été prise constante et égale à 600 ppm au cours de l'évolution.

- Nous avons 5 valeurs de densité d'eau correspondant aux 5 valeurs de température du modérateur pour une pression de 155 bars.

- L'évolution aux conditions nominales ($\bar{T}_m$ = 306°C, $\bar{T}_c$ = 650°C) a été faite avec les valeurs suivantes de taux de combustion en MWj/T :

  . De 0 à 33 000, avec des pas de 3 000 pour l'assemblage enrichi à 2,1 %.

  . De 0 à 52 000, avec des pas de 4 000 pour l'assemblage enrichi à 3,1 % sans poison consommable.

  . De 0 à 24 000, avec des pas de 3 000 pour l'assemblage enrichi à 2,6 %.

  . De 0 à 24 000, avec des pas de 4 000 pour l'assemblage enrichi à 3,1 % avec poison consommable.

III.2 - CALCUL DU COEUR AU COURS DU PREMIER CYCLE A DEUX DIMENSIONS

Pour le premier cycle, nous avons adopté le même choix de schéma du calcul de coeur à deux dimensions qu'en début de vie : calcul de coeur BILAN qui résout l'équation de la diffusion par la méthode aux éléments finis à deux groupes d'énergies (coupure 0.625 eV) et effectué avec quatre pavés par assemblage, en approximation "Cubique Lagrange (CL16)".

Les calculs de coeur du premier cycle sont effectués de deux façons :

- avec contre-réactions par le module CRONOS qui permet l'enchaînement du calcul de diffusion à 2D effectué par BILAN et de calculs thermohydrauliques effectués par FLICA III ;

- sans contre-réactions par le module BILAN.

On effectue les calculs à plusieurs pas d'évolution qui correspondent aux taux de combustion suivants, exprimés en MWj/T :

0, 280, 500, 1173, 2748, 4000, 5363, 6500, 7755, 9000, 10844, 13340, 14979.

La fin du premier cycle correspond à la valeur de 14979 MWj/T (donnée prévisionnelle d'exploitation).

Pour chaque step, on donne la concentration critique en bore (données expérimentales, fournies par EDF).

On a imposé des valeurs du laplacien axial variant en fonction du taux de combustion, ces valeurs ont été déterminées au préalable par comparaison entre deux calculs de l'assemblage 3.1 % sans poison consommable en évolution : un calcul ponctuel et un calcul axial (en z). Les valeurs du B_z^2 sont données dans le tableau (III.1).

Les constantes homogènes de réflecteur ont été calculées, aux températures nominales de 306°C et 650°C pour le combustible, par la méthode

décrite au chapitre II [II.2.1.1] mais en séparant une table secondaire de bore représentant l'effet du bore soluble, et qui nous permettra de prendre en considération l'effet dû à la variation de la concentration du bore en évolution sur ces mêmes constantes.

Les résultats seront présentés comme suit :

- Une étude de la réactivité.
- Une comparaison des valeurs d'activités entre l'expérience et les calculs.
- Une étude de l'effet des contre-réactions par comparaison des résultats des deux calculs CRONOS et BILAN.

III.2.1 - Calcul du coeur avec couplage thermohydraulique par CRONOS

Pour le calcul thermohydraulique chaque assemblage définit un canal et le calcul est effectué en régime permanent dans les conditions "canal fermé".

Les calculs sont réalisés à 5 %, 50 % et 73 % de puissance nominale(*) pendant les trois premiers pas d'évolution, selon la montée en puissance progressive du réacteur. On indique les valeurs de concentration en bore critique ainsi que la puissance correspondant à chaque taux de combustion dans le tableau (III.2), (données expérimentales).

III.2.1.1 - Interprétation des résultats

a) Réactivité

Les valeurs propres calculées sont données dans le tableau (III.3) et représentées sur la figure III.1. Les réactivités sont aussi indiquées dans le tableau (III.3).

(*) Puissance nucléaire nominale = 2652 Mw.

On constate une diminution de la valeur propre en évolution, soit une une dérive de 700 pcm.

b) Comparaison des valeurs d'activités entre l'expérience et le calcul

Nous avons comparé les valeurs d'activités calculées et les valeurs expérimentales à chaque taux de combustion ; dans les tableaux (III.4) à (III.12) on indique les valeurs expérimentales, les valeurs calculées et les écarts.

On remarque que les écarts calcul-expérience s'atténuent en évolution, nettement à partir de 2 748 MWj/T. L'écart moyen dans les assemblages respectivement enrichis à 2.1 % et à 2.6 % atteint

0.21 % et - 0.23 %

au lieu des écarts moyens de

0.53 % et 2.04 %

pour les mêmes types d'assemblage à 280 MWj/T.

En fin de cycle ces mêmes écarts deviennent très faibles et inférieurs à 0.6 %.

L'effet de damier est inférieur à 0.5 % à 2 748 MWj/T et le reste jusqu'en fin de cycle, alors qu'il était de 1.5 % à 280 MWj/T.

On constate aussi que les écarts sur les assemblages périphériques tendent à diminuer en évolution, passant

de - 5.07 % à 280 MWj/T

à - 4.34 % à 2 748 MWj/T

et - 1.02 % en fin de cycle.

Irradiation (MWJ/T)	Laplacien axial
0	0.68 E-04
280	0.88 E-04
500	0.96 E-04
1173	1.20 E-04
2748	1.62 E-04
4000	1.85 E-04
5363	2.00 E-04
6500	2.08 E-04
7755	2.14 E-04
9000	2.19 E-04
10844	2.28 E-04
13340	2.38 E-04
14979	2.44 E-04

Tableau III.1 _ Evolution du Laplacien axial en fonction du taux de combustion.

Irradiation (MWJ/T)	Puissance (MW)	C_B * (ppm)
0	5 % PN	1325**
280	50 % PN	1025
500	73 % PN	983
1173	100 % PN	898
2748	100 % PN	860
4000	100 % PN	805
5363	100 % PN	730
6500	100 % PN	660
7755	100 % PN	572
9000	100 % PN	485
10844	100 % PN	352
13340	100 % PN	137
14979	100 % PN	19

Tableau III-2 – Evolution de la concentration en bore soluble.

* C_B : concentration en bore soluble.

** Cas sans xénon.

Irradiation (MWJ/T)	Valeur propre	Réactivité (pcm)
0	1.00008*	8
280	0.99927	-73
500	0.99747	-254
1173	0.99871	-129
2748	0.99604	-398
4000	0.99398	-606
5363	0.99314	-691
6500	0.99271	-734
7755	0.99316	-689
9000	0.99303	-702
10844	0.99258	-748
13340	0.99418	-585
14979	0.99280	-725

Tableau III. 3 _ Valeur propre et réactivité, pour le cycle 1, obtenues par le calcul CRONOS.

* Calcul sans xénon.

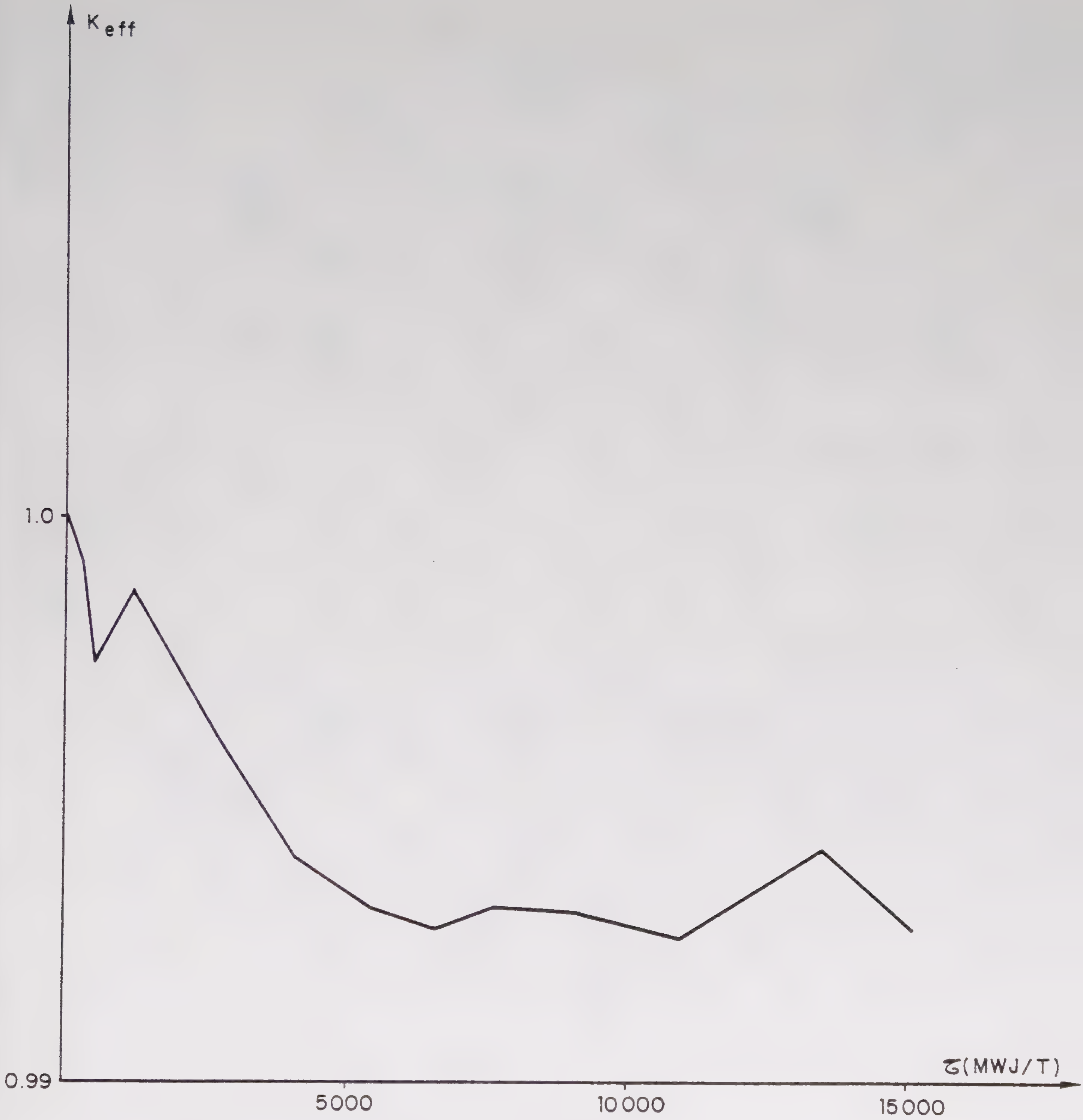


Figure III.1 _ Variation de valeur propre en évolution.

CALCUL : C
EXP : E
(C-E)/E (%):

PLAN 1
2D CR

280. MWJ/T
50. % PN
1025. PPM

							0.6820 0.7185 -5.08							
									0.7567 0.7954 -4.87					
			0.5316 0.5687 -6.52			1.3033 1.3129 -0.70	1.0752 1.0414 3.25				0.5316 0.5746 -7.48			
				0.8937 0.8871 0.74			1.3606 1.3460 1.08		1.2746 1.2847 -0.79					
		0.7429 0.7376 0.59		1.2654 1.2536 0.95		1.3480 1.3300 1.36				1.2654 1.2716 -0.48	0.8937 0.8920 0.19		0.5050 0.5346 -5.54	
				1.0230 0.9906 3.27			1.3329 1.3187 1.07		1.3604 1.3475 0.95					
		1.3038 1.2995 0.33				1.3246 1.2971 2.12		1.3246 1.2976 2.08			1.0300 1.0069 2.30		0.8080 0.8137 -0.70	
0.6820 0.7211 -5.42		1.0752 1.0364 3.74		1.0000 0.9774 2.31					1.3329 1.3039 2.22			1.0752 1.0279 4.60	1.2197 1.2215 -0.15	
				1.3480 1.3313 1.26				1.3246 1.3016 1.76	1.0404 1.0014 3.89					0.5257 0.5590 -5.96
		0.9134 0.9174 -0.43				1.0404 1.0121 2.80					1.2746 1.2699 0.37		0.7567 0.7820 -3.23	
				1.2654 1.2710 -0.44			1.0000 0.9837 1.66		1.0230 1.0013 2.16	1.2654 1.2609 0.36				
		0.5316 0.5727 -7.17				1.0300 1.0208 0.90					0.9806 1.0144 -3.33	0.5316 0.5690 -6.56		
							1.0752 1.0518 2.23		0.9134 0.9228 -1.02					
				0.5050 0.5415 -6.75				0.8080 0.8355 -3.29						
						0.5257 0.5716 -8.04								

Tableau III.4 - Comparaison des activités expérimentales et calculées avec effets de contre-réactions à 280 MWJ/T.

CALCUL : C	*
EXP : E	*
(C-E)/E (%):	*

PLAN 1
2D CR

500. MWJ/T
73. % PN
983. PPM

							0.6653 0.6958 -4.37							
									0.7435 0.7779 -4.43					
			0.5301 0.5637 -5.96			1.2918 1.2958 -0.31	1.0653 1.0337 3.05				0.5301 0.5666 -6.44			
				0.8952 0.8873 0.90			1.3611 1.3500 0.82		1.2754 1.2817 -0.49					
		0.7364 0.7246 1.59		1.2712 1.2635 0.61		1.3577 1.3478 0.74				1.2712 1.2756 -0.35	0.8952 0.8918 0.39		0.4998 0.5283 -5.38	
				1.0311 1.0047 2.62			1.3507 1.3489 0.14		1.3727 1.3578 1.10					
		1.2918 1.2773 1.14				1.3444 1.3266 1.34		1.3444 1.3293 1.14			1.0326 1.0149 1.74		0.7930 0.7990 -0.75	
0.6653 0.6949 -4.25		1.0653 1.0310 3.33		1.0123 0.9965 1.58					1.3507 1.3277 1.73			1.0653 1.0255 3.88	1.1968 1.1912 0.46	
				1.3577 1.3530 0.35				1.3444 1.3264 1.36	1.0549 1.0256 2.86					0.5157 0.5452 -5.42
		0.9075 0.9090 -0.17				1.0549 1.0358 1.85					1.2754 1.2659 0.75		0.7435 0.7634 -2.62	
				1.2712 1.2799 -0.68			1.0123 1.0010 1.12		1.0311 1.0142 1.66	1.2712 1.2621 0.72				
		0.5301 0.5663 -6.38				1.0326 1.0295 0.30					0.9809 1.0065 -2.55	0.5301 0.5634 -5.91		
							1.0653 1.0404 2.39		0.9075 0.9124 -0.54					
				0.4998 0.5310 -5.87				0.7930 0.8142 -2.60						
						0.5157 0.5534 -6.83								

TABLEAU III.5 - COMPARAISON DES ACTIVITÉS EXPÉRIMENTALES ET CALCULÉES AVEC EFFETS DE CONTRE-RÉACTIONS À 500 MWJ/T.

CALCUL : C *
EXP : E *
(C-E)/E (%) : *

PLAN 1
2D CR

1173. MWJ/T
100. % PN
898. PPM

							0.6477 0.6686 -3.11							
									0.7308 0.7558 -3.31					
			0.5317 0.5601 -5.06			1.2726 1.2718 0.07	1.0524 1.0305 2.13				0.5317 0.5663 -6.11			
				0.9019 0.8975 0.49			1.3543 1.3522 0.16		1.2733 1.2705 0.22					
		0.7342 0.7233 1.50		1.2747 1.2650 0.77		1.3638 1.3570 0.50				1.2747 1.2768 -0.17	0.9019 0.9025 -0.06		0.4971 0.5225 -4.86	
				1.0419 1.0234 1.80			1.3676 1.3696 -0.15		1.3795 1.3699 0.69					
		1.2726 1.2551 1.40				1.3657 1.3622 0.25		1.3657 1.3523 0.99			1.0364 1.0248 1.14		0.7781 0.7829 -0.62	
0.6477 0.6642 -2.48		1.0524 1.0203 3.15		1.0295 1.0234 0.60					1.3676 1.3460 1.60			1.0524 1.0153 3.66	1.1667 1.1557 0.95	
				1.3638 1.3624 0.10				1.3657 1.3494 1.20	1.0727 1.0537 1.80					0.5068 0.5302 -4.43
		0.9045 0.9031 0.16				1.0727 1.0603 1.17					1.2733 1.2615 0.94		0.7308 0.7507 -2.66	
				1.2747 1.2778 -0.24			1.0295 1.0222 0.71		1.0419 1.0297 1.19	1.2747 1.2639 0.85				
		0.5317 0.5640 -5.71				1.0364 1.0304 0.58					0.9836 1.0008 -1.72	0.5317 0.5611 -5.24		
							1.0524 1.0276 2.41		0.9045 0.9074 -0.32					
				0.4971 0.5239 -5.11				0.7781 0.7977 -2.45						
						0.5068 0.5363 -5.59								

TABLEAU III.6 - COMPARAISON DES ACTIVITÉS EXPÉRIMENTALES ET CALCULÉES AVEC EFFETS DE CONTRE-RÉACTIONS À 1173 MWJ/T.

CALCUL : C *
EXP : E *
(C-E)/E (%): *

PLAN 1
2D CR

2748. MWJ/T
100. % PN
860. PPM

							0.6268 0.6510 -3.71							
									0.7253 0.7540 -3.81					
			0.5390 0.5692 -5.31			1.2444 1.2464 -0.16	1.0437 1.0349 0.85				0.5390 0.5732 -5.97			
				0.9210 0.9261 -0.56			1.3343 1.3236 0.81		1.2651 1.2684 -0.26					
		0.7477 0.7458 0.25		1.2711 1.2623 0.70		1.3567 1.3488 0.58				1.2711 1.2751 -0.31	0.9210 0.9347 -1.47		0.4997 0.5285 -5.45	
				1.0599 1.0518 0.77			1.3715 1.3717 -0.01		1.3732 1.3700 0.23					
		1.2444 1.2309 1.10				1.3748 1.3660 0.64		1.3748 1.3658 0.66			1.0466 1.0511 -0.43		0.7721 0.7901 -2.28	
0.6268 0.6492 -3.45		1.0437 1.0292 1.41		1.0527 1.0603 -0.72					1.3715 1.0000 37.15			1.0437 1.0272 1.61	1.1236 1.1237 -0.00	
				1.3567 1.3550 0.12				1.3748 1.3656 0.67	1.0966 1.0966 -0.00					0.4959 0.5255 -5.63
		0.9135 0.9254 -1.28				1.0966 1.1017 -0.46					1.2651 1.2610 0.32		0.7253 0.7489 -3.16	
				1.2711 1.2697 0.12			1.0527 1.0600 -0.69		1.0599 1.0670 -0.67	1.2711 1.2654 0.45				
		0.5390 0.5757 -6.38				1.0466 1.0574 -1.02					0.9864 1.0048 -1.83	0.5390 0.5703 -5.50		
							1.0437 1.0356 0.78		0.9135 0.9304 -1.81					
				0.4997 0.5290 -5.54				0.7721 0.7996 -3.45						
						0.4959 0.5263 -5.78								

TABLEAU III.7 - COMPARAISON DES ACTIVITÉS EXPÉRIMENTALES ET CALCULÉES AVEC EFFETS DE CONTRE-RÉACTIONS À 2748 MWJ/T.

CALCUL : C *
EXP : E *
(C-E)/E (%): *

PLAN I
2D CR

5363. MWJ/T
100. % PN
730. PPM

							0.6236 0.6898 -9.60							
									0.7341 0.7510 -2.25					
			0.5571 0.5799 -3.93			1.2221 1.2176 0.37	1.0437 1.0326 1.08				0.5571 0.5851 -4.78			
				0.9524 0.9561 -0.38			1.3040 1.2810 1.79		1.2528 1.2384 1.16					
		0.7767 0.7756 0.15		1.2583 1.2346 1.91		1.3278 1.3270 0.06				1.2583 1.2413 1.37	0.9524 0.9613 -0.92		0.5159 0.5368 -3.90	
				1.0722 1.0658 0.60			1.3441 1.3346 0.71		1.3393 1.3067 2.50					
		1.2221 1.1931 2.43				1.3475 1.3331 1.08		1.3475 1.3246 1.72			1.0583 1.0527 0.54		0.7820 0.7871 -0.66	
0.6236 0.6307 -1.13		1.0437 1.0197 2.36		1.0690 1.0732 -0.40					1.3441 1.3180 1.98			1.0437 1.0193 2.40	1.1011 1.0736 2.57	
				1.3278 1.3088 1.45				1.3475 1.3353 0.91	1.1054 1.0989 0.59					0.5009 0.5166 -3.05
		0.9396 0.9460 -0.67				1.1054 1.1090 -0.33					1.2528 1.2303 1.83		0.7341 0.7435 -1.27	
				1.2583 1.2554 0.22			1.0690 1.0748 -0.55		1.0722 1.0676 0.44	1.2583 1.2327 2.07				
		0.5571 0.6211 -10.31				1.0583 1.0649 -0.62					1.0005 1.0016 -0.12	0.5571 0.5793 -3.83		
							1.0437 1.0229 2.03		0.9396 0.9453 -0.61					
				0.5159 0.5897 -12.52				0.7820 0.7948 -1.62						
						0.5009 0.5215 -3.96								

Tableau III.8 - Comparaison des activités expérimentales et calculées avec effets de contre-réactions à 5363 MWJ/T.

CALCUL : C	*
EXP : E	*
(C-E)/E (%):	*

PLAN 1
2D CR

7755. MWJ/T
100. % PN
572. PPM

							0.6188 0.6285 -1.53							
									0.7379 0.7559 -2.38					
			0.5701 0.5921 -3.72			1.2079 1.1917 1.36	1.0436 1.0332 1.00				0.5701 0.5963 -4.40			
				0.9769 0.9804 -0.35			1.2819 1.2639 1.43		1.2459 1.2332 1.03					
		0.7981 0.8040 -0.73		1.2520 1.2320 1.13		1.3064 1.2940 0.96				1.2520 1.2428 0.73	0.9769 0.9861 -0.93		0.5269 0.5435 -3.06	
				1.0810 1.0743 0.62			1.3236 1.3113 0.94		1.3151 1.2933 1.69					
		1.2079 1.1837 2.05				1.3285 1.3133 1.15		1.3285 1.3127 1.20			1.0663 1.0690 -0.25		0.7881 0.8050 -2.09	
0.6188 0.6275 -1.39		1.0436 1.0280 1.51		1.0790 1.0886 -0.88					1.3236 1.3089 1.12			1.0436 1.0243 1.88	1.0847 1.0617 2.17	
				1.3064 1.2922 1.10				1.3285 1.3139 1.11	1.1099 1.1104 -0.04					0.5032 0.5210 -3.42
		0.9593 0.9659 -0.69				1.1099 1.1130 -0.27					1.2459 1.2328 1.06		0.7379 0.7512 -1.77	
				1.2520 1.2417 0.83			1.0790 1.0876 -0.79		1.0810 1.0864 -0.50	1.2520 1.2342 1.44				
		0.5701 0.5981 -4.68				1.0663 1.0766 -0.95					1.0101 1.0149 -0.48	0.5701 0.5910 -3.54		
							1.0436 1.0279 1.53		0.9593 0.9683 -0.93					
				0.5269 0.5477 -3.80				0.7881 0.8083 -2.49						
						0.5032 0.5258 -4.30								

Tableau III.9 - Comparaison des activités expérimentales et calculées avec effets de contre-réactions à 7755 MWJ/T.

CALCUL : C ✱
EXP : E ✱
(C-E)/E (%): ✱

PLAN 1
2D CR

10844. MWJ/T
100. % PN
352. PPM

							0.6287 0.6331 -1.47							
									0.7524 0.7734 -2.72					
			0.5896 0.5995 -1.65			1.2040 1.1910 1.10	1.0495 1.0396 0.95				0.5896 0.6117 -3.62			
				1.0064 1.0072 -0.07			1.2606 1.2429 1.42		1.2418 1.2307 0.90					
		0.8304 0.8278 0.31		1.2449 1.2348 0.81		1.2757 1.2632 0.99				1.2449 1.2356 0.75	1.0064 1.1128 -9.56		0.5457 0.5624 -2.97	
				1.0794 1.0757 0.34			1.2830 1.2754 0.59		1.2794 1.2622 1.36					
		1.2040 1.1839 1.70				1.2844 1.2728 0.91		1.2844 1.2684 1.26			1.0690 1.0734 -0.41		0.8083 0.8195 -1.38	
0.6287 0.6319 -0.50		1.0495 1.0434 0.58		1.0700 1.0852 -1.40					1.2830 1.2730 0.79			1.0495 1.0337 1.53	1.0882 1.0758 1.15	
				1.2757 1.2557 1.59				1.2844 1.2748 0.75	1.0924 1.0940 -0.14					0.5163 0.5326 -3.05
		0.9880 0.9946 -0.66				1.0924 1.0934 -0.09					1.2418 1.2311 0.86		0.7524 0.7637 -1.49	
				1.2449 1.2387 0.49			1.0700 1.0791 -0.84		1.0794 1.0813 -0.17	1.2449 1.2307 1.15				
		0.5896 0.6138 -3.95				1.0690 1.0779 -0.82					1.0307 1.0258 0.48	0.5896 0.6067 -2.82		
							1.0495 1.0348 1.41		0.9880 0.9922 -0.43					
				0.5457 0.5615 -2.82				0.8083 0.8229 -1.78						
						0.5163 0.5399 -4.38								

TABLEAU III.10 - COMPARAISON DES ACTIVITÉS EXPÉRIMENTALES ET CALCULÉES AVEC EFFETS DE CONTRE-RÉACTIONS À 10 844 MWJ/T.

CALCUL : C *
EXP : E *
(C-E)/E (%): *

PLAN 1
2D CR

13340. MWJ/T
100. % PN
137. PPM

							0.6374 0.6557 -2.79							
									0.7608 0.7756 -1.91					
			0.5995 0.6102 -1.75			1.2047 1.1942 0.88	1.0508 1.0460 0.46				0.5995 0.6257 -4.19			
				1.0176 1.0153 0.23			1.2497 1.2326 1.38		1.2393 1.2262 1.06					
		0.8459 0.8483 -0.28		1.2411 1.2300 0.91		1.2616 1.2432 1.48				1.2411 1.2349 0.51	1.0176 1.0267 -0.89		0.5556 0.5662 -1.87	
				1.0726 1.0696 0.28			1.2661 1.2490 1.37		1.2625 1.2443 1.47					
		1.2047 1.1918 1.08				1.2678 1.2468 1.68		1.2678 1.2425 2.04			1.0646 1.0682 -0.33		0.8215 0.8360 -1.73	
0.6374 0.6473 -1.53		1.0508 1.0487 0.20		1.0585 1.0763 -1.66					1.2661 1.2443 1.75			1.0508 1.0356 1.46	1.0955 1.0878 0.71	
				1.2616 1.2540 0.60				1.2678 1.2481 1.58	1.0799 1.0784 0.14					0.5276 0.5462 -3.41
		1.0002 1.0131 -1.27				1.0799 1.0751 0.45					1.2393 1.2286 0.87		0.7608 0.7699 -1.18	
				1.2411 1.2343 0.55			1.0585 1.0679 -0.88		1.0726 1.0758 -0.30	1.2411 1.2242 1.38				
		0.5995 0.6179 -2.99				1.0646 1.0784 -1.27					1.0412 1.0400 0.12	0.5995 0.6117 -2.00		
							1.0508 1.0442 0.63		1.0002 1.0082 -0.79					
				0.5556 0.5673 -2.06				0.8215 0.8442 -2.69						
						0.5276 0.5526 -4.52								

TABLEAU III.11 - COMPARAISON DES ACTIVITÉS EXPÉRIMENTALES ET CALCULÉES AVEC EFFETS DE CONTRE-RÉACTIONS À 13 340 MWJ/T.

CALCUL : C ✱
EXP : E ✱
(C-E)/E (%): ✱

PLAN 1
2D CR

14979. MWJ/T
100. % PN
19. PPM

							0.6536 0.6554 -0.28							
									0.7741 0.7854 -1.43					
			0.6127 0.6120 0.12			1.2120 1.1976 1.20	1.0559 1.0455 0.99				0.6127 0.6236 -1.75			
				1.0267 1.0200 0.66			1.2426 1.2338 0.72		1.2403 1.2311 0.74					
		0.8620 0.8539 0.95		1.2394 1.2268 1.03		1.2449 1.2362 0.71				1.2394 1.2336 0.47	1.0267 1.0291 -0.24		0.5683 0.5737 -0.93	
				1.0625 1.0576 0.47			1.2394 1.2380 0.11		1.2426 1.2302 1.01					
		1.2120 1.1946 1.45				1.2372 1.2377 -0.04		1.2372 1.2314 0.47			1.0601 1.0664 -0.59		0.8372 0.8492 -1.42	
0.6536 0.6547 -0.17		1.0559 1.0462 0.92		1.0402 1.0626 -2.11					1.2394 1.2357 0.29			1.0559 1.0363 1.89	1.1126 1.1065 0.55	
				1.2449 1.2477 -0.23				1.2372 1.2398 -0.21	1.0576 1.0619 -0.41					0.5417 0.5486 -1.26
		1.0120 1.0176 -0.55				1.0576 1.0643 -0.63					1.2403 1.2293 0.89		0.7741 0.7789 -0.62	
				1.2394 1.2392 0.01			1.0402 1.0621 -2.07		1.0625 1.0674 -0.46	1.2394 1.2268 1.02				
		0.6127 0.6261 -2.13				1.0601 1.0732 -1.22					1.0561 1.0504 0.55	0.6127 0.6175 -0.77		
							1.0559 1.0425 1.28		1.0120 1.0185 -0.64					
				0.5683 0.5755 -1.25				0.8372 0.8528 -1.83						
						0.5417 0.5555 -2.48								

TABLEAU III.12 - COMPARAISON DES ACTIVITÉS EXPÉRIMENTALES ET CALCULÉES AVEC EFFETS DE CONTRE-RÉACTIONS À 14 979 MWJ/T.

III.2.2 - Calcul du coeur sans contre-réaction par BILAN

Les calculs ont été effectués pour tous les pas d'irradiation aux températures nominales ($\overline{T}_m$ = 306°C et $\overline{T}_c$ = 650°C) dans tous les assemblages et à puissance nominale (2 652 MW).

Pour les calculs avec contre-réaction, la concentration en bore critique suit la montée de puissance du réacteur. Le calcul sans contre-réactions étant effectué à pleine puissance dès le début de vie, il est donc nécessaire de réajuster la courbe de la concentration en bore critique. Les nouvelles valeurs de concentration en bore sont données dans le tableau (III.13).

III.2.2.1 - Interprétation des résultats

a) Réactivité

Les valeurs propres ainsi que les réactivités sont indiquées dans le tableau (III.14) ; on note une diminution de la valeur propre en évolution, soit une dérive de 900 pcm.

b) Comparaison des valeurs d'activités entre l'expérience et le calcul

Les comparaisons calcul-expérience des valeurs d'activité pour les différents taux de combustion figurent dans les tableaux (III.15) à (III.23).

On note que les écarts calculs-expérience ont tendance à diminuer en évolution ; les écarts moyens au centre dans les assemblages enrichis à 2.1 % et à 2.6 % respectivement de :

2.69 % et 2.97 % à 280 MWj/T

deviennent

1.48 % et 1.00 % à 2 748 MWj/T

Irradiation (MWJ/T)	C_B* (ppm)
0	1205**
280	910
500	905

Tableau III.13 _ Evolution de la concentration en bore soluble.

Irradiation (MWJ/T)	Valeur propre	Réactivité (pcm)
0	1.00318**	317
280	1.00092	92
500	1.00094	94
1173	1.00059	59
2748	0.99843	-157
4000	0.99594	-408
5363	0.99502	-500
6500	0.99442	-561
7755	0.99470	-533
9000	0.99448	-555
10844	0.99368	-636
13340	0.99504	-498
14979	0.99376	-628

Tableau III.14 _ Valeur propre et réactivité, pour le cycle 1, obtenues par le calcul BILAN.

---

* C_B : concentration en bore soluble.

** Calcul sans xénon.

CALCUL : C *
EXP : E *
(C-E)/E (%): *

PLAN 1
2D SC C1

280. MWJ/T
100. % PN
910. PPM

							0.6228 0.7185 -13.31							
									0.7029 0.7954 -11.64					
			0.4918 0.5687 -13.51			1.2886 1.3129 -1.85	1.0702 1.0414 2.77				0.4918 0.5746 -14.41			
				0.8747 0.8871 -1.39			1.3889 1.3460 3.18		1.2822 1.2847 -0.19					
		0.6976 0.7376 -5.43		1.2827 1.2536 2.33		1.4046 1.3300 5.61				1.2827 1.2716 0.88	0.8747 0.8920 -1.93		0.4602 0.5346 -13.92	
				1.0506 0.9906 6.05			1.4023 1.3187 6.34		1.4260 1.3475 5.82					
		1.2886 1.2995 -0.84				1.4055 1.2971 8.36		1.4055 1.2976 8.31			1.0453 1.0069 3.82		0.7619 0.8137 -6.36	
0.6228 0.7211 -13.62		1.0702 1.0364 3.26		1.0443 0.9774 6.84					1.4023 1.3039 7.55			1.0702 1.0279 4.12	1.1686 1.2215 -4.33	
				1.4046 1.3313 5.50				1.4055 1.3016 7.98	1.0933 1.0014 9.18					0.4765 0.5590 -14.76
		0.8810 0.9174 -3.97				1.0933 1.0121 8.03					1.2822 1.2699 0.97		0.7029 0.7820 -10.11	
				1.2827 1.2710 0.93			1.0443 0.9837 6.16		1.0506 1.0013 4.92	1.2827 1.2609 1.73				
		0.4918 0.5727 -14.12				1.0453 1.0208 2.40					0.9412 1.0144 -7.22	0.4918 0.5690 -13.56		
							1.0702 1.0518 1.75		0.8810 0.9228 -4.53					
				0.4602 0.5415 -15.03				0.7619 0.8355 -8.81						
						0.4765 0.5716 -16.64								

TABLEAU III.15 - COMPARAISON DES ACTIVITÉS EXPÉRIMENTALES ET CALCULÉES SANS EFFETS DE CONTRE-RÉACTIONS À 280 MWJ/T.

CALCUL : C *
EXP : E *
(C-E)/E (%): *

PLAN 1
2D SC C1

500. MWJ/T
100. % PN
905. PPM

							0.6199 0.6958 -10.90							
									0.7012 0.7779 -9.85					
			0.4906 0.5637 -12.97			1.2847 1.2958 -0.85	1.0697 1.0337 3.48				0.4906 0.5666 -13.41			
				0.8757 0.8873 -1.31			1.3870 1.3500 2.74		1.2801 1.2817 -0.12					
		0.6972 0.7248 -3.80		1.2808 1.2635 1.37		1.4050 1.3478 4.24				1.2808 1.2756 0.40	0.8757 0.8918 -1.81		0.4592 0.5283 -13.07	
				1.0536 1.0047 4.87			1.4052 1.3489 4.18		1.4256 1.3578 5.00					
		1.2847 1.2773 0.58				1.4094 1.3266 6.24		1.4094 1.3293 6.03			1.0476 1.0149 3.22		0.7610 0.7990 -4.76	
0.6199 0.6949 -10.79		1.0697 1.0310 3.76		1.0498 0.9965 5.35					1.4052 1.3277 5.84			1.0697 1.0255 4.32	1.1622 1.1912 -2.43	
				1.4050 1.3530 3.84				1.4094 1.3264 6.26	1.0986 1.0256 7.12					0.4754 0.5452 -12.81
		0.8816 0.9090 -3.01				1.0986 1.0358 6.06					1.2801 1.2659 1.12		0.7012 0.7634 -8.15	
				1.2808 1.2799 0.07			1.0498 1.0010 4.88		1.0536 1.0142 3.89	1.2808 1.2621 1.48				
		0.4906 0.5663 -13.36				1.0476 1.0295 1.76					0.9379 1.0065 -6.81	0.4906 0.5634 -12.92		
							1.0697 1.0404 2.81		0.8816 0.9124 -3.37					
				0.4592 0.5310 -13.51				0.7610 0.8142 -6.53						
						0.4754 0.5534 -14.11								

TABLEAU III.16 - COMPARAISON DES ACTIVITÉS EXPÉRIMENTALES ET CALCULÉES SANS EFFETS DE CONTRE-RÉACTIONS À 500 MWJ/T.

CALCUL : C *
EXP : E *
(C-E)/E (%): *

PLAN 1
2D SC C1

1173. MWJ/T
100. % PN
898. PPM

							0.5973 0.6686 -10.65							
									0.6898 0.7558 -8.73					
			0.4908 0.5601 -12.36			1.2609 1.2718 -0.85	1.0575 1.0305 2.62				0.4908 0.5663 -13.33			
				0.8843 0.8975 -1.48			1.3770 1.3522 1.84		1.2759 1.2705 0.43					
		0.6990 0.7233 -3.36		1.2829 1.2650 1.42		1.4097 1.3570 3.88				1.2829 1.2768 0.47	0.8843 0.9025 -2.02		0.4550 0.5225 -12.92	
				1.0685 1.0234 4.40			1.4247 1.3696 4.03		1.4348 1.3699 4.74					
		1.2609 1.2551 0.46				1.4339 1.3622 5.26		1.4339 1.3523 6.04			1.0533 1.0248 2.78		0.7467 0.7829 -4.64	
0.5973 0.6642 -10.06		1.0575 1.0203 3.65		1.0696 1.0234 4.52					1.4247 1.3460 5.85			1.0575 1.0153 4.16	1.1242 1.1557 -2.73	
				1.4097 1.3624 3.47				1.4339 1.3494 6.26	1.1243 1.0537 6.70					0.4608 0.5302 -13.09
		0.8800 0.9031 -2.55				1.1243 1.0603 6.04					1.2759 1.2615 1.14		0.6898 0.7507 -8.12	
				1.2829 1.2778 0.40			1.0696 1.0222 4.64		1.0685 1.0297 3.77	1.2829 1.2639 1.50				
		0.4908 0.5640 -12.97				1.0533 1.0304 2.22					0.9365 1.0008 -6.43	0.4908 0.5611 -12.53		
							1.0575 1.0276 2.91		0.8800 0.9074 -3.02					
				0.4550 0.5239 -13.15				0.7467 0.7977 -6.39						
						0.4608 0.5368 -14.15								

TABLEAU III.17 - COMPARAISON DES ACTIVITÉS EXPÉRIMENTALES ET CALCULÉES SANS EFFETS DE CONTRE-RÉACTIONS À 1173 MWJ/T.

CALCUL : C *
EXP : E *
(C-E)/E (%): *

PLAN 1
2D SC C1

2748. MWJ/T
100. % PN
860. PPM

							0.5780 0.6510 -11.21							
									0.6847 0.7540 -9.19					
			0.4971 0.5692 -12.66			1.2329 1.2464 -1.09	1.0487 1.0349 1.33				0.4971 0.5732 -13.27			
				0.9030 0.9261 -2.50			1.3567 1.3236 2.50		1.2674 1.2684 -0.08					
		0.7122 0.7458 -4.50		1.2775 1.2623 1.21		1.4001 1.3488 3.81				1.2775 1.2751 0.19	0.9030 0.9347 -3.39		0.4577 0.5285 -13.39	
				1.0876 1.0518 3.41			1.4279 1.3717 4.10		1.4245 1.3700 3.98					
		1.2329 1.2309 0.16				1.4420 1.3660 5.56		1.4420 1.3658 5.57			1.0654 1.0511 1.36		0.7401 0.7901 -6.32	
0.5780 0.6492 -10.96		1.0487 1.0292 1.89		1.0962 1.0603 3.38					1.4279 1.0000 42.79			1.0487 1.0272 2.09	1.0824 1.1237 -3.67	
				1.4001 1.3550 3.33				1.4420 1.3656 5.59	1.1504 1.0966 4.90					0.4516 0.5255 -14.05
		0.8899 0.9254 -3.83				1.1504 1.1017 4.42					1.2674 1.2610 0.51		0.6847 0.7489 -8.58	
				1.2775 1.2697 0.62			1.0962 1.0600 3.41		1.0876 1.0670 1.93	1.2775 1.2654 0.96				
		0.4971 0.5757 -13.64				1.0654 1.0574 0.76					0.9391 1.0048 -6.54	0.4971 0.5703 -12.83		
							1.0487 1.0356 1.26		0.8899 0.9304 -4.35					
				0.4577 0.5290 -13.48				0.7401 0.7996 -7.44						
						0.4516 0.5263 -14.19								

TABLEAU III.18 - COMPARAISON DES ACTIVITÉS EXPÉRIMENTALES ET CALCULÉES SANS EFFETS DE CONTRE-RÉACTIONS À 2748 MWJ/T.

CALCUL : C *
EXP : E *
(C-E)/E (%): *

PLAN I
2D SC C1

5363. MWJ/T
100. % PN
730. PPM

							0.5813 0.6898 -15.72							
									0.6989 0.7510 -6.93					
			0.5194 0.5799 -10.43			1.2120 1.2176 -0.46	1.0499 1.0326 1.67				0.5194 0.5851 -11.23			
				0.9396 0.9561 -1.72			1.3211 1.2810 3.13		1.2550 1.2384 1.35					
		0.7473 0.7756 -3.65		1.2642 1.2346 2.39		1.3622 1.3270 2.65				1.2642 1.2413 1.84	0.9396 0.9613 -2.25		0.4777 0.5368 -11.01	
				1.0995 1.0658 3.16			1.3880 1.3346 4.00		1.3791 1.3067 5.54					
		1.2120 1.1931 1.58				1.4009 1.3331 5.08		1.4009 1.3246 5.75			1.0772 1.0527 2.33		0.7553 0.7871 -4.05	
0.5813 0.6307 -7.83		1.0499 1.0197 2.96		1.1104 1.0732 3.46					1.3880 1.3180 5.31			1.0499 1.0193 3.00	1.0671 1.0736 -0.61	
				1.3622 1.3088 4.08				1.4009 1.3353 4.91	1.1547 1.0989 5.08					0.4614 0.5166 -10.68
		0.9211 0.9460 -2.63				1.1547 1.1090 4.12					1.2550 1.2303 2.01		0.6989 0.7435 -5.99	
				1.2642 1.2554 0.69			1.1104 1.0748 3.31		1.0995 1.0676 2.99	1.2642 1.2327 2.55				
		0.5194 0.6211 -16.39				1.0772 1.0649 1.16					0.9606 1.0016 -4.10	0.5194 0.5793 -10.34		
							1.0499 1.0229 2.63		0.9211 0.9453 -2.56					
				0.4777 0.5897 -18.99				0.7553 0.7948 -4.97						
						0.4614 0.5215 -11.52								

TABLEAU III.19 - COMPARAISON DES ACTIVITÉS EXPÉRIMENTALES ET CALCULÉES SANS EFFETS DE CONTRE-RÉACTIONS À 5363 MWJ/T.

CALCUL : C *
EXP : E *
(C-E)/E (%): *

PLAN 1
2D SC C1

7755. MWJ/T
100. % FN
572. PPM

							0.5825 0.6285 -7.31							
									0.7094 0.7559 -6.15					
			0.5376 0.5921 -9.22			1.2027 1.1917 0.92	1.0531 1.0332 1.92				0.5376 0.5963 -9.85			
				0.9717 0.9804 -0.89			1.2961 1.2639 2.55		1.2508 1.2332 1.43					
		0.7770 0.8040 -3.36		1.2593 1.2380 1.72		1.3313 1.2940 2.88				1.2593 1.2428 1.32	0.9717 0.9861 -1.46		0.4931 0.5435 -9.27	
				1.1067 1.0743 3.01			1.3507 1.3113 3.01		1.3426 1.2933 3.81					
		1.2027 1.1837 1.61				1.3618 1.3133 3.69		1.3618 1.3127 3.74			1.0859 1.0690 1.59		0.7680 0.8050 -4.59	
0.5825 0.6275 -7.17		1.0531 1.0280 2.44		1.1142 1.0886 2.35					1.3507 1.3089 3.19			1.0531 1.0243 2.81	1.0582 1.0617 -0.33	
				1.3313 1.2922 3.03				1.3618 1.3139 3.64	1.1474 1.1104 3.34					0.4679 0.5210 -10.19
		0.9484 0.9659 -1.81				1.1474 1.1130 3.09					1.2508 1.2328 1.46		0.7094 0.7512 -5.56	
				1.2593 1.2417 1.42			1.1142 1.0876 2.45		1.1067 1.0864 1.86	1.2593 1.2342 2.03				
		0.5376 0.5981 -10.12				1.0859 1.0766 0.86					0.9795 1.0149 -3.49	0.5376 0.5910 -9.05		
							1.0531 1.0279 2.45		0.9484 0.9683 -2.05					
				0.4931 0.5477 -9.96				0.7680 0.8083 -4.99						
						0.4679 0.5258 -11.00								

TABLEAU III.20 - COMPARAISON DES ACTIVITÉS EXPÉRIMENTALES ET CALCULÉES SANS EFFETS DE CONTRE-RÉACTIONS À 7755 MWJ/T.

CALCUL : C	*
EXP : E	*
(C-E)/E (%):	*

PLAN 1
2D SC C1

10844. MWJ/T
100. % PN
352. PPM

							0.6039 0.6381 -5.35							
									0.7395 0.7734 -4.39					
			0.5705 0.5995 -4.85			1.2102 1.1910 1.62	1.0657 1.0396 2.52				0.5705 0.6117 -6.74			
				1.0186 1.0072 1.13			1.2667 1.2429 1.91		1.2533 1.2307 1.84					
		0.8278 0.8278 0.00		1.2559 1.2348 1.71		1.2807 1.2632 1.39				1.2559 1.2356 1.64	1.0186 1.1128 -8.47		0.5239 0.5624 -6.84	
				1.0965 1.0757 1.93			1.2741 1.2754 -0.11		1.2811 1.2622 1.49					
		1.2102 1.1839 2.23				1.2776 1.2728 0.38		1.2776 1.2684 0.72			1.0869 1.0734 1.25		0.8027 0.8195 -2.05	
0.6039 0.6319 -4.42		1.0657 1.0434 2.14		1.0849 1.0852 -0.03					1.2741 1.2730 0.09			1.0657 1.0337 3.10	1.0783 1.0758 0.23	
				1.2807 1.2557 1.98				1.2776 1.2748 0.22	1.1009 1.0940 0.64					0.4903 0.5326 -7.94
		0.9954 0.9946 0.08				1.1009 1.0934 0.69					1.2533 1.2311 1.80		0.7395 0.7637 -3.17	
				1.2559 1.2387 1.39			1.0849 1.0791 0.53		1.0965 1.0813 1.41	1.2559 1.2307 2.05				
		0.5705 0.6138 -7.07				1.0869 1.0779 0.83					1.0214 1.0258 -0.42	0.5705 0.6067 -5.97		
							1.0657 1.0348 2.99		0.9954 0.9922 0.32					
				0.5239 0.5615 -6.69				0.8027 0.8229 -2.45						
						0.4903 0.5399 -9.20								

TABLEAU III.21 - COMPARAISON DES ACTIVITÉS EXPÉRIMENTALES ET CALCULÉES SANS EFFETS DE CONTRE-RÉACTIONS À 10 844 MWJ/T.

CALCUL : C *
EXP : E *
(C-E)/E (%): *

PLAN 1
2D SC C1

13340. MWJ/T
100. % PN
137. PPM

							0.6271 0.6557 -4.36							
									0.7611 0.7756 -1.87					
			0.5894 0.6102 -3.40			1.2232 1.1942 2.43	1.0767 1.0460 2.93				0.5894 0.6257 -5.80			
				1.0410 1.0153 2.53			1.2520 1.2326 1.57		1.2554 1.2262 2.38					
		0.8584 0.8483 1.19		1.2533 1.2300 1.90		1.2492 1.2432 0.48				1.2533 1.2349 1.49	1.0410 1.0267 1.39		0.5437 0.5662 -3.98	
				1.0814 1.0696 1.10			1.2251 1.2490 -1.91		1.2431 1.2443 -0.10					
		1.2232 1.1918 2.63				1.2231 1.2468 -1.90		1.2231 1.2425 -1.56			1.0812 1.0682 1.22		0.8326 0.8360 -0.40	
0.6271 0.6473 -3.12		1.0767 1.0487 2.66		1.0560 1.0763 -1.89					1.2251 1.2443 -1.54			1.0767 1.0356 3.96	1.1060 1.0878 1.67	
				1.2492 1.2540 -0.39				1.2231 1.2481 -2.00	1.0617 1.0784 -1.55					0.5122 0.5462 -6.23
		1.0228 1.0131 0.95				1.0617 1.0751 -1.24					1.2554 1.2286 2.18		0.7611 0.7699 -1.14	
				1.2533 1.2343 1.54			1.0560 1.0679 -1.12		1.0814 1.0758 0.52	1.2533 1.2242 2.38				
		0.5894 0.6179 -4.61				1.0812 1.0784 0.26					1.0463 1.0400 0.60	0.5894 0.6117 -3.64		
							1.0767 1.0442 3.11		1.0228 1.0082 1.45					
				0.5437 0.5673 -4.17				0.8326 0.8442 -1.36						
						0.5122 0.5526 -7.31								

Tableau III.22 - Comparaison des activités expérimentales et calculées sans effets de contre-réactions à 13 340 MWJ/t.

CALCUL : C *
EXP : E *
(C-E)/E (%): *

PLAN 1
2D SC C1

14979. MWJ/T
100. % PN
19. PPM

							0.6311 0.6554 -3.71							
									0.7645 0.7854 -2.65					
			0.5940 0.6120 -2.94			1.2220 1.1976 2.04	1.0750 1.0455 2.82				0.5940 0.6236 -4.76			
				1.0440 1.0200 2.35			1.2474 1.2338 1.10		1.2533 1.2311 1.80					
		0.8662 0.8539 1.44		1.2503 1.2268 1.92		1.2454 1.2362 0.75				1.2503 1.2336 1.36	1.0440 1.0291 1.44		0.5473 0.5737 -4.59	
				1.0764 1.0576 1.78			1.2225 1.2380 -1.25		1.2380 1.2302 0.64					
		1.2220 1.1946 2.30				1.2210 1.2377 -1.35		1.2210 1.2314 -0.85			1.0773 1.0664 1.03		0.8398 0.8492 -1.11	
0.6311 0.6547 -3.60		1.0750 1.0462 2.75		1.0494 1.0626 -1.24					1.2225 1.2357 -1.07			1.0750 1.0363 3.74	1.1094 1.1065 0.27	
				1.2454 1.2477 -0.19				1.2210 1.2398 -1.51	1.0577 1.0619 -0.40					0.5173 0.5486 -5.71
		1.0266 1.0176 0.88				1.0577 1.0643 -0.63					1.2533 1.2293 1.96		0.7645 0.7789 -1.84	
				1.2503 1.2392 0.90			1.0494 1.0621 -1.20		1.0764 1.0674 0.84	1.2503 1.2268 1.91				
		0.5940 0.6261 -5.13				1.0773 1.0732 0.39					1.0496 1.0504 -0.07	0.5940 0.6175 -3.81		
							1.0750 1.0425 3.11		1.0266 1.0185 0.79					
				0.5473 0.5755 -4.90				0.8398 0.8528 -1.53						
						0.5173 0.5555 -6.88								

TABLEAU III.23 - COMPARAISON DES ACTIVITÉS EXPÉRIMENTALES ET CALCULÉES SANS EFFETS DE CONTRE-RÉACTIONS À 14 979 MWJ/T.

et ne sont plus que de

0.56 % et 1.15 % en fin de cycle.

On observe que les écarts dans les assemblages enrichis à 3.1 % en périphérie changent de :

- 12.35 % à 280 MWj/T

à - 11.05 % à 2 748 MWj/T

en fin de cycle ce même écart atteint - 3.45 %.

Il n'y a pas d'effet de damier en début de cycle (280 MWj/T) ; il apparaît mais demeure faible (0.5 %) à 2 748 MWj/T ainsi qu'en fin de cycle.

III.2.3 - Conclusion

Au vu des résultats de la comparaison calcul-expérience des valeurs d'activités dans les deux cas de calcul de coeur, avec et sans contre-réactions, on mesure l'importance de la prise en compte des contre-réactions. Les résultats obtenus sont alors satisfaisants.

Néanmoins, deux effets supplémentaires sont à prendre en considération :

- Effet 2D/3D : lié au fait que le calcul neutronique ayant été effectué à deux dimensions avec une distribution axiale de flux prise identique dans tous les assemblages ne représente pas exactement la réalité. Cependant, au cours du premier cycle où la distribution axiale des taux de combustion est uniforme en début de vie (coeur neuf) cet effet est limité, comme l'expérience de démarrage le démontre.

- Effet de mesure : lié aux défauts de mesure qui peuvent donner des valeurs expérimentales assez dispersées. En évolution, il est difficile de tenir compte de l'expérience de plusieurs tranches pour réduire l'écart-type comme on a pu le faire pour l'expérience de démarrage.

Quant à la convergence des résultats expérimentaux et des résultats de calcul nous pouvons en donner l'interprétation suivante :

- Soit la disparition du poison consommable en évolution, ce dernier étant peut-être la cause des écarts calcul-expérience observés en début de cycle.

- Soit un effet de compensation de l'erreur sur le flux par une erreur induite sur le taux de combustion au cours du cycle.

En ce qui concerne les dérives de réactivités constatées en évolution, lors des calculs CRONOS (700 pcm) et BILAN (900 pcm), elles peuvent avoir plusieurs origines :

- L'ajustement du ν du ^{239}Pu lors de la préparation des bibliothèques évolutives n'est plus justifié comme il ressort des études de tendances récentes effectuées au SERMA [25], ce point augmenterait la dérive.

- La construction des bibliothèques évolutives avec une concentration moyenne en bore soluble de 600 ppm au lieu de la concentration réelle au long de l'évolution [26].

- Les ^{239}Pu et ^{236}U ne sont pas auto-protégés en évolution [27].

- La sous-estimation de l'efficacité initiale des poisons consommables.

- Surestimation de l'effet de puissance (effet Doppler, effet de température de modérateur et mise à l'équilibre du xénon).

- Diminution de la température effective du combustible en évolution.

III.2.4 - Etude paramétrique de l'effet des contre-réactions

Nous allons examiner maintenant, par la comparaison des résultats de calcul CRONOS et BILAN, l'effet dû à la prise en compte des contre-réactions.

Pour cela, nous allons comparer certains paramètres susceptibles de nous permettre de cerner au mieux cet effet, soit :

- les réactivités,
- distributions de puissance,
- valeurs d'activités,
- taux de combustion en fin de cycle.

Notre but était d'évaluer l'effet des variations de températures du combustible et du modérateur, prises en compte par CRONOS par rapport aux valeurs moyennes d'évolution utilisées dans le calcul sans contre-réactions BILAN.

Dans cette comparaison, l'effet des seules contre-réactions peut être séparé pour le coeur neuf et les faibles taux de combustion. Pour les taux de combustion élevés deux effets se superposent :

- l'effet instantané des contre-réactions,
- la modification de la distribution des taux de combustion dans le coeur due à la prise en compte des contre-réactions au cours de l'évolution préalable.

III.2.4.1 - Réactivité

Nous présentons dans le tableau (III.24) les écarts sur les valeurs propres issues du calcul BILAN en évolution par rapport à celles du calcul CRONOS.

On remarque que l'écart de 309 pcm en début de vie, évolue au cours du cycle pour n'être plus que de 97 pcm en fin de cycle.

III.2.4.2 - Distribution de puissance

Nous avons comparé la distribution de puissance dans les deux cas de calcul ; avec et sans contre-réaction, pour certains pas d'irradiation :

280, 1173, 5363, 7755, 10844 et 14979 (fin de cycle)

afin de voir l'évolution de l'effet de contre-réactions pendant le cycle, les résultats de cette comparaison sont indiqués dans les tableaux (III.25) à (III.30).

On constate un effet important de ± 7 % des contre-réactions en début de cycle qui tend à un aplatissement de la distribution de puissance.

Cet effet évolue au long du cycle ; à 7 755 MWj/T il reste important à la périphérie (3 à 5 %) ; en fin de cycle l'effet global de contre-réaction a diminué : on observe des écarts dans les assemblages du centre inférieurs à 2 % et légèrement plus importants dans les assemblages en périphérie : 2 % à 3 %.

III.2.4.3 - Valeurs d'activités

Les valeurs d'activités calculées sont comparées pour les deux calculs, BILAN et CRONOS, et pour les mêmes pas d'irradiation mentionnés ci-dessus, tableaux (III.31) à (III.36).

On remarque un effet global important des contre-réactions en début de cycle de + 6 % au centre et de - 9 % en périphérie à 280 MWj/T. Cet effet diminue en cours d'évolution, pour n'atteindre plus que 2.5 % au centre et - 5 % à - 7 % en périphérie à 7 755 MWj/T (mi-cycle). Il n'est plus que de - 1 % au centre et de - 3 % en périphérie en fin de cycle.

On constate donc une évolution convergente des distributions d'activités, liée à une compensation partielle des écarts par la modification de la distribution des taux de combustion.

III.2.4.4 - Taux de combustion en fin de cycle

En dernier lieu, la comparaison des taux de combustion en fin de cycle pour les calculs avec et sans contre-réactions nous donne des écarts de 2 % au centre et variant de - 3 % à - 5 % à la périphérie du coeur, tableau (III.37).

III.2.4.5 - Conclusion

La comparaison des calculs BILAN et CRONOS met en évidence le rôle joué par les contre-réactions sur :

- La valeur propre ; on note une réduction de la dérive de réactivité constatée en cours d'évolution de 200 pcm.

- La distribution de puissance ; en début de cycle, le calcul CRONOS donne une distribution de puissance plus aplatie que le calcul BILAN, mais l'effet des contre-réactions sur la réactivité locale et sur le taux de combustion évoluant en cours de cycle, nous arrivons, en fin de celui-ci, à une convergence des distributions de puissance.

- Les valeurs d'activités ; la comparaison entre les valeurs calculées d'activité montre que les écarts importants en début de cycle, dus aux contre-réactions, diminuent en évolution et deviennent faibles en fin de vie.

- Le taux de combustion en fin de cycle ; on constate que le calcul BILAN surestime les valeurs du taux de combustion de 2 % au centre du coeur, mais sous-estime celles-ci de 3 % à 5 % en périphérie par rapport au calcul CRONOS ; ce qui pourra provoquer des erreurs lors des calculs des cycles suivants, après repositionnement des assemblages.

Irradiation (MWJ/T)	Ecart sur la valeur propre (pcm)*
0	309
280	165
500	347
1173	188
2748	239
4000	197
5363	189
6500	172
7755	155
9000	146
10844	111
13340	86
14979	97

Tableau III.24 _ Effet des contre-réactions sur la valeur propre

*Ecart par rapport au calcul avec des contre-réactions.

Ecart = $(P_{SSCR}/P_{CR})-1\%$

					-3.50	-6.16		
				1.82	-1.37	-5.16	-7.65	
			5.34	3.38	1.09	-2.85	-6.08	
		6.64	5.80	4.63	2.24	-0.71	-4.72	-8.04
Assemblage central →	6.81	6.33	6.25	4.55	2.88	-0.17	-3.81	-7.58

Tableau III.25 _ Effet des contre-réactions sur la distribution de puissance à 280 MWJ/T.

Ecart = $(P_{SSCR}/P_{CR})-1\%$

					-4.2	-6.5		
				1.1	-1.5	-4.2	-7.2	
			4.4	3.0	0.7	-2.2	-4.9	
		5.5	5.2	3.8	2.1	-0.5	-3.6	-7.9
Assemblage central →	5.5	5.4	5.1	3.7	2.5	0.3	-3.2	-6.9

Tableau III. 26 _ Effet des contre-réactions sur la distribution de puissance à 1173 MWJ/T.

Ecart = $(P_{SSCR}/P_{CR}) - 1\%$

					-3.41	-5.62		
				0.81	-1.05	-3.31	-6.24	
			3.2	2.5	0.55	-1.7	-4.0	
		4.2	4.3	2.8	1.9	-0.47	-2.9	-6.7
Assemblage central →	4.4	4.8	3.9	3.4	1.8	0.35	-2.8	-5.9

Tableau III.27 _ Effet des contre-réactions sur la distribution de puissance à 5363 MWJ/T.

Ecart = $(P_{SSCR}/P_{CR}) - 1\%$

					-2.45	-4.52		
				0.91	-0.28	-2.26	-5.18	
			2.25	2.17	0.64	-0.86	-3.11	
		2.57	3.10	2.00	1.78	-0.10	-2.16	-5.77
Assemblage central →	2.67	3.21	2.50	2.67	1.42	0.52	-2.07	-4.93

Tableau III.28 _ Effet des contre-réactions sur la distribution de puissance à 7755 MWJ/T.

Ecart = (P_{SSCR}/P_{CR}) - 1%

					-0.4	-2.1		
				1.0	1.1	0.0	-2.8	
			0.0	1.1	1.0	0.8	-1.1	
		-0.7	0.3	0.3	1.3	0.7	-0.5	-3.8
Assemblage central →	-0.8	-0.2	-0.4	0.7	0.6	1.1	-0.6	-0.6

Tableau III. 29 _ Effet des contre - réactions sur la distribution de puissance à 10 844 MWJ/T.

Ecart = (P_{SSCR} / P_{CR}) - 1%

					-0.2	-1.9		
				0.8	1.4	0.7	-2.4	
			-0.6	0.8	0.9	1.3	-0.5	
		-1.5	-0.6	-0.1	1.1	0.9	0.3	-3.2
Assemblage central →	-1.8	-1.2	-1.1	0.1	0.6	1.2	0.0	-2.4

Tableau III.30 _ Effet des contre - réactions sur la distribution de puissance à 14 979 MWJ/T.

calcul sans CR : C *
calcul avec CR : E *
(C-E)/E (%) : *

PLAN 1
2D SC,CR

280. MWJ/T
100. % PN
910. PPM

							0.6228 0.6820 -8.67							
									0.7029 0.7567 -7.11					
			0.4918 0.5316 -7.48			1.2886 1.3038 -1.17	1.0702 1.0752 -0.46				0.4918 0.5316 -7.48			
				0.8747 0.8937 -2.12			1.3889 1.3606 2.08		1.2822 1.2746 0.60					
		0.6976 0.7419 -5.97		1.2827 1.2654 1.37		1.4046 1.3480 4.20				1.2827 1.2654 1.37	0.8747 0.8937 -2.12		0.4602 0.5050 -8.88	
				1.0506 1.0230 2.69			1.4023 1.3329 5.21		1.4260 1.3604 4.82					
		1.2886 1.3038 -1.17				1.4055 1.3246 6.11		1.4055 1.3246 6.11			1.0453 1.0300 1.49		0.7619 0.8080 -5.70	
0.6228 0.6820 -8.67		1.0702 1.0752 -0.46		1.0443 1.0000 4.43					1.4023 1.3329 5.21			1.0702 1.0752 -0.46	1.1686 1.2197 -4.19	
				1.4046 1.3480 4.20				1.4055 1.3246 6.11	1.0933 1.0404 5.08					0.4765 0.5257 -9.36
		0.8810 0.9134 -3.55				1.0933 1.0404 5.08					1.2822 1.2746 0.60		0.7029 0.7567 -7.11	
				1.2827 1.2654 1.37			1.0443 1.0000 4.43		1.0506 1.0230 2.69	1.2827 1.2654 1.37				
		0.4918 0.5316 -7.48				1.0453 1.0300 1.49					0.9412 0.9806 -4.02	0.4918 0.5316 -7.48		
							1.0702 1.0752 -0.46		0.8810 0.9134 -3.55					
				0.4602 0.5050 -8.88				0.7619 0.8080 -5.70						
						0.4765 0.5257 -9.36								

TABLEAU III.31 - COMPARAISON DES ACTIVITÉS OBTENUES PAR LE CALCUL SANS CONTRE-RÉACTIONS ET LE CALCUL AVEC CONTRE-RÉACTIONS À 280 MWJ/T.

Calcul sans CR : C *
Calcul avec CR : E *
(C-E)/E (%): : *

PLAN - 1
2D SC,CR

1173. MWJ/T
100. % PN
898. PPM

							0.5973 0.6477 -7.77							
									0.6898 0.7308 -5.61					
			0.4908 0.5317 -7.69			1.2609 1.2726 -0.92	1.0575 1.0524 0.49				0.4908 0.5317 -7.69			
				0.8843 0.9019 -1.95			1.3770 1.3543 1.68		1.2759 1.2733 0.20					
		0.6990 0.7342 -4.80		1.2829 1.2747 0.64		1.4097 1.3638 3.37				1.2829 1.2747 0.64	0.8843 0.9019 -1.95		0.4550 0.4971 -8.47	
				1.0685 1.0419 2.55			1.4247 1.3676 4.18		1.4348 1.3795 4.01					
		1.2609 1.2726 -0.92				1.4339 1.3657 5.00		1.4339 1.3657 5.00			1.0533 1.0364 1.63		0.7467 0.7781 -4.04	
0.5973 0.6477 -7.77		1.0575 1.0524 0.49		1.0696 1.0295 3.90					1.4247 1.3676 4.18			1.0575 1.0524 0.49	1.1242 1.1667 -3.64	
				1.4097 1.3638 3.37				1.4339 1.3657 5.00	1.1243 1.0727 4.81					0.4608 0.5069 -9.09
		0.8800 0.9045 -2.71				1.1243 1.0727 4.81					1.2759 1.2733 0.20		0.6898 0.7308 -5.61	
				1.2829 1.2747 0.64			1.0696 1.0295 3.90		1.0685 1.0419 2.55	1.2829 1.2747 0.64				
		0.4908 0.5317 -7.69				1.0533 1.0364 1.63					0.9365 0.9836 -4.79	0.4908 0.5317 -7.69		
							1.0575 1.0524 0.49		0.8800 0.9045 -2.71					
				0.4550 0.4971 -8.47				0.7467 0.7781 -4.04						
						0.4608 0.5068 -9.07								

Tableau III.32 - Comparaison des activités obtenues par le calcul sans contre-réactions et le calcul avec contre-réactions à 1173 MWJ/T.

Calcul sans CR : C ✱
Calcul avec CR : E ✱
(C-E)/E (%) : ✱

PLAN 1
2D SC,CR

5363. MWJ/T
100. % PN
730. PPM

							0.5813 0.6236 -6.78							
									0.6989 0.7341 -4.79					
			0.5194 0.5571 -6.77			1.2120 1.2221 -0.83	1.0499 1.0437 0.59				0.5194 0.5571 -6.77			
				0.9396 0.9524 -1.34			1.3211 1.3040 1.31		1.2550 1.2528 0.18					
		0.7473 0.7767 -3.79		1.2642 1.2583 0.46		1.3622 1.3278 2.59				1.2642 1.2583 0.46	0.9396 0.9524 -1.34		0.4777 0.5159 -7.40	
				1.0995 1.0722 2.55			1.3880 1.3441 3.27		1.3791 1.3393 2.97					
		1.2120 1.2221 -0.83				1.4009 1.3475 3.96		1.4009 1.3475 3.96			1.0772 1.0583 1.79		0.7553 0.7820 -3.42	
0.5813 0.6236 -6.78		1.0499 1.0437 0.59		1.1104 1.0690 3.87					1.3880 1.3441 3.27			1.0499 1.0437 0.59	1.0671 1.1011 -3.09	
				1.3622 1.3278 2.59				1.4009 1.3475 3.96	1.1547 1.1054 4.46					0.4614 0.5009 -7.88
		0.9211 0.9396 -1.97				1.1547 1.1054 4.46					1.2550 1.2528 0.18		0.6989 0.7341 -4.79	
				1.2642 1.2583 0.46			1.1104 1.0690 3.87		1.0995 1.0722 2.55	1.2642 1.2583 0.46				
		0.5194 0.5571 -6.77				1.0772 1.0583 1.79					0.9606 1.0005 -3.99	0.5194 0.5571 -6.77		
							1.0499 1.0437 0.59		0.9211 0.9396 -1.97					
				0.4777 0.5159 -7.40				0.7553 0.7820 -3.42						
						0.4614 0.5009 -7.88								

TABLEAU III.33 - COMPARAISON DES ACTIVITÉS OBTENUES PAR LE CALCUL SANS CONTRE-RÉACTIONS ET LE CALCUL AVEC CONTRE-RÉACTIONS À 5363 MWJ/T.

Calcul sans CR : C ×
Calcul avec CR : E ×
(C-E)/E (%) : ×

PLAN 1
2D SC,CR

7755. MWJ/T
100. % PN
572. PPM

							0.5825 0.6188 -5.86							
									0.7094 0.7379 -3.86					
			0.5376 0.5701 -5.71			1.2027 1.2079 -0.43	1.0531 1.0436 0.91				0.5376 0.5701 -5.71			
				0.9717 0.9769 -0.53			1.2961 1.2819 1.11		1.2508 1.2459 0.39					
		0.7770 0.7981 -2.64		1.2593 1.2520 0.58		1.3313 1.3064 1.91				1.2593 1.2520 0.58	0.9717 0.9769 -0.53		0.4931 0.5269 -6.41	
				1.1067 1.0810 2.37			1.3507 1.3236 2.05		1.3426 1.3151 2.09					
		1.2027 1.2079 -0.43				1.3618 1.3285 2.50		1.3618 1.3285 2.50			1.0859 1.0663 1.84		0.7680 0.7881 -2.55	
0.5825 0.6188 -5.86		1.0531 1.0436 0.91		1.1142 1.0790 3.26					1.3507 1.3236 2.05			1.0531 1.0436 0.91	1.0582 1.0847 -2.45	
				1.3313 1.3064 1.91				1.3618 1.3285 2.50	1.1474 1.1099 3.38					0.4679 0.5032 -7.01
		0.9484 0.9593 -1.13				1.1474 1.1099 3.38					1.2508 1.2459 0.39		0.7094 0.7379 -3.86	
				1.2593 1.2520 0.58			1.1142 1.0790 3.26		1.1067 1.0810 2.37	1.2593 1.2520 0.58				
		0.5376 0.5701 -5.71				1.0859 1.0663 1.84					0.9795 1.0101 -3.03	0.5376 0.5701 -5.71		
							1.0531 1.0436 0.91		0.9484 0.9593 -1.13					
				0.4931 0.5269 -6.41				0.7680 0.7881 -2.55						
						0.4679 0.5032 -7.01								

TABLEAU III.34 - COMPARAISON DES ACTIVITÉS OBTENUES PAR LE CALCUL SANS CONTRE-RÉACTIONS ET LE CALCUL AVEC CONTRE-RÉACTIONS À 7755 MWJ/T.

Calcul sans CR : C *
Calcul avec CR : E *
(C-E)/E (%) : *

PLAN 1
2D SC,CR

10844. MWJ/T
100. % PN
352. PPM

							0.6039 0.6287 -3.94							
									0.7395 0.7524 -1.71					
			0.5705 0.5896 -3.25			1.2102 1.2040 0.52	1.0657 1.0495 1.55				0.5705 0.5896 -3.25			
				1.0186 1.0064 1.21			1.2667 1.2606 0.48		1.2533 1.2418 0.93					
		0.8278 0.8304 -0.31		1.2559 1.2449 0.89		1.2807 1.2757 0.39				1.2559 1.2449 0.89	1.0186 1.0064 1.21		0.5239 0.5457 -3.99	
				1.0965 1.0794 1.59			1.2741 1.2830 -0.69		1.2811 1.2794 0.13					
		1.2102 1.2040 0.52				1.2776 1.2844 -0.53		1.2776 1.2844 -0.53			1.0869 1.0690 1.67		0.8027 0.8083 -0.69	
0.6039 0.6287 -3.94		1.0657 1.0495 1.55		1.0849 1.0700 1.39					1.2741 1.2830 -0.69			1.0657 1.0495 1.55	1.0783 1.0882 -0.91	
				1.2807 1.2757 0.39				1.2776 1.2844 -0.53	1.1009 1.0924 0.78					0.4903 0.5163 -5.04
		0.9954 0.9880 0.75				1.1009 1.0924 0.78					1.2533 1.2418 0.93		0.7395 0.7524 -1.71	
				1.2559 1.2449 0.89			1.0849 1.0700 1.39		1.0965 1.0794 1.59	1.2559 1.2449 0.89				
		0.5705 0.5896 -3.25				1.0869 1.0690 1.67					1.0214 1.0307 -0.90	0.5705 0.5896 -3.25		
							1.0657 1.0495 1.55		0.9954 0.9880 0.75					
				0.5239 0.5457 -3.99				0.8027 0.8083 -0.69						
						0.4903 0.5163 -5.04								

TABLEAU III.35 - COMPARAISON DES ACTIVITÉS OBTENUES PAR LE CALCUL SANS CONTRE-RÉACTIONS ET LE CALCUL AVEC CONTRE-RÉACTIONS À 10 844 MWJ/T.

Calcul sans CR : C	*
Calcul avec CR : E	*
(C-E)/E (%) :	*

PLAN 1
2D SC,CR

14979. MWJ/T
100. % PN
19. PPM

							0.6311 0.6536 -3.44							
									0.7645 0.7741 -1.23					
			0.5940 0.6127 -3.06			1.2220 1.2120 0.83	1.0750 1.0559 1.81				0.5940 0.6127 -3.06			
				1.0440 1.0267 1.68			1.2474 1.2426 0.38		1.2533 1.2403 1.05					
		0.8662 0.8620 0.49		1.2503 1.2394 0.88		1.2454 1.2449 0.04				1.2503 1.2394 0.88	1.0440 1.0267 1.68		0.5473 0.5683 -3.69	
				1.0764 1.0625 1.31			1.2225 1.2394 -1.36		1.2380 1.2426 -0.37					
		1.2220 1.2120 0.83				1.2210 1.2372 -1.31		1.2210 1.2372 -1.31			1.0773 1.0601 1.63		0.8398 0.8372 0.31	
0.6311 0.6536 -3.44		1.0750 1.0559 1.81		1.0494 1.0402 0.89					1.2225 1.2394 -1.36			1.0750 1.0559 1.81	1.1094 1.1126 -0.29	
				1.2454 1.2449 0.04				1.2210 1.2372 -1.31	1.0577 1.0576 0.01					0.5173 0.5417 -4.51
		1.0266 1.0120 1.44				1.0577 1.0576 0.01					1.2533 1.2403 1.05		0.7645 0.7741 -1.23	
				1.2503 1.2394 0.88			1.0494 1.0402 0.89		1.0764 1.0625 1.31	1.2503 1.2394 0.88				
		0.5940 0.6127 -3.06				1.0773 1.0601 1.63					1.0496 1.0561 -0.62	0.5940 0.6127 -3.06		
							1.0750 1.0559 1.81		1.0266 1.0120 1.44					
				0.5473 0.5683 -3.69				0.8398 0.8372 0.31						
						0.5173 0.5417 -4.51								

TABLEAU III.36 - COMPARAISON DES ACTIVITÉS OBTENUES PAR LE CALCUL SANS CONTRE-RÉACTIONS ET LE CALCUL AVEC CONTRE-RÉACTIONS À 14 979 MWJ/T.

Ecart = $(\tau_{SSCR}/\tau_{CR}) - 1\%$

					-2.14	-4.15		
				0.94	-0.14	-2.02	-4.84	
			2.16	2.00	0.76	-0.70	-2.95	
		2.35	2.70	1.94	1.62	0.05	-2.00	-5.59
Assemblage central →	2.27	2.65	2.31	2.24	1.44	0.63	-1.97	-4.82

Tableau III.37 _ Effet des contre-réactions sur le taux de combustion en fin de cycle.

III.3 - ETUDES COMPLEMENTAIRES DE CALCUL DU PREMIER CYCLE

Il nous a paru nécessaire d'approfondir les calculs sur le cycle 1, par certaines études complémentaires :

- Test d'une représentation plus fine du couplage thermohydraulique dans des zones de fort gradient de distribution de puissance.

- Evaluation de l'effet d'une erreur éventuelle sur l'efficacité des grappes de poison consommable.

- Effet de l'ajustement de constantes de réflecteur au long de cycle sur les résultats de calcul.

III.3.1 - Test d'une représentation plus fine du couplage thermohydraulique dans des zones de fort gradient de distribution de puissance

Nous avons refait le calcul de coeur à deux dimensions en utilisant le code CRONOS pour le pas d'irradiation à 1 173 MWj/T, et à puissance nominale, en définissant, cette fois-ci, non pas un [tableau (III.6)], mais quatre canaux par assemblage périphérique ; ceci, afin de voir d'une part, l'effet sur les résultats du coeur entier et d'autre part, l'effet sur les écarts calcul-expérience dans les seuls assemblages périphériques représentant des zones de fort gradient du flux et qui, relativement, ont les écarts calcul-expérience les plus importants.

III.3.1.1 - Résultats

De la comparaison des résultats de calculs d'activités, des écarts calcul-expérience et de la distribution de puissance entre les deux cas cités (un seul ou quatre canaux par assemblage périphérique), il apparaît que les résultats sont identiques à 0.3 % près. L'écart maximum, en périphérie, n'est que de 0.6 %, [tableaux (III.6), (III.38) et (III.39)].

III.3.1.2 - Conclusion

Il s'avère d'après ce test, qu'une représentation plus fine du couplage thermohydraulique n'influe que très peu sur les résultats des calculs de coeur, tant au niveau des valeurs d'activités, qu'au niveau de la distribution de puissance.

Calcul	: C	*
Exp.	: E	*
(C-E)/E (%)	:	*

PLAN 1
2D CR 4C

1173. MWJ/T
100. % PN
898. PPM

							0.6455 0.6686 -3.45							
									0.7296 0.7558 -3.47					
			0.5332 0.5601 -4.80			1.2706 1.2718 -0.09	1.0512 1.0305 2.01				0.5332 0.5663 -5.85			
				0.9028 0.8975 0.58			1.3538 1.3522 0.12		1.2739 1.2705 0.27					
		0.7345 0.7233 1.55		1.2763 1.2650 0.90		1.3642 1.3570 0.53				1.2763 1.2768 -0.04	0.9028 0.9025 0.03		0.4974 0.5225 -4.82	
				1.0425 1.0234 1.87			1.3685 1.3696 -0.08		1.3802 1.3699 0.75					
		1.2706 1.2551 1.23				1.3671 1.3622 0.35		1.3671 1.3523 1.10			1.0362 1.0248 1.11		0.7761 0.7829 -0.87	
0.6455 0.6642 -2.81		1.0512 1.0203 3.04		1.0297 1.0234 0.61					1.3685 1.3460 1.67			1.0512 1.0153 3.54	1.1630 1.1557 0.63	
				1.3642 1.3624 0.13				1.3671 1.3494 1.31	1.0735 1.0537 1.88					0.5054 0.5302 -4.69
		0.9038 0.9031 0.08				1.0735 1.0603 1.25					1.2739 1.2615 0.99		0.7296 0.7507 -2.82	
				1.2763 1.2778 -0.11			1.0297 1.0222 0.73		1.0425 1.0297 1.25	1.2763 1.2639 0.98				
		0.5332 0.5640 -5.45				1.0362 1.0304 0.56					0.9851 1.0008 -1.57	0.5332 0.5611 -4.98		
							1.0512 1.0276 2.30		0.9038 0.9074 -0.40					
				0.4974 0.5239 -5.06				0.7761 0.7977 -2.70						
						0.5054 0.5368 -5.85								

TABLEAU III.38 - COMPARAISON DES ACTIVITÉS EXPERIMENTALES ET CALCULÉES AVEC 4 CANAUX PAR ASSEMBLAGE.

Ecart = $(P_{4C}/P) - 1$%

					0.15	0.02		
				0.18	0.10	0.04	-0.19	
			0.08	0.17	0.18	-0.05	-0.30	
		0.17	0.17	0.08	0.08	-0.09	-0.25	-0.55
Assemblage central →	0.26	0.26	0.08	0.09	0.08	0.00	-0.30	-0.61

Tableau III. 39 _ Effet d'une représentation plus fine du couplage thermohydraulique sur la distribution de puissance.

III.3.2 - Evaluation de l'effet d'une erreur éventuelle sur l'efficacité des grappes de poison consommable

Dans cette étude, nous chercherons l'influence d'une erreur éventuelle du traitement de l'usure des poisons consommables sur les paramètres suivants du coeur :

- Valeur propre.
- Valeur d'activités.
- Distribution de puissance.

Il est apparu comme probable que l'absorption du poison consommable (pyrex) en début de vie est trop faible, d'où une efficacité moindre de celui-ci.

Pour représenter une correction éventuelle de l'absorption des grappes de pyrex, dans les assemblages empoisonnés, on a modifié conventionnellement la concentration en bore soluble dans ces assemblages.

Nous avons effectué un calcul de coeur en début de vie, à puissance et à taux de combustion nuls, en augmentant la concentration en bore soluble, dans les seuls assemblages empoisonnés, de 80 et 160 ppm qui correspondent respectivement à 5 % et 10 % d'efficacité du poison consommable en début de vie.

III.3.2.1 - Résultats

Nous allons représenter les résultats pour les trois cas de calcul :

1 - Cas de référence à 1 330 ppm ; (cal 1 330).

2 - Cas à (1 330 + 80 ppm) dans les assemblages empoisonnés ; (cal 1 410).

3 - Cas à (1 330 + 160 ppm) dans les assemblages empoisonnés ; (cal 1 490).

a) Valeur propre

On compare pour ces trois cas de calcul les valeurs propres, tableau (III.40). On remarque un effet important sur les valeurs propres, - 336 et - 668 pcm respectivement dans les calculs (cal 1 410) et (cal 1 490) par rapport au calcul de référence (cal 1 330).

b) Valeurs d'activités

Dans les tableaux (III.41) à (III.43), on représente les trois cartes d'activité pour ces trois calculs de coeur (cal 1 330), (cal 1 410) et (cal 1 490).

Les écarts moyens calcul-expérience dans les assemblages enrichis à 2.1 % et à 2.6 %, respectivement, de

1.15 % et 1.79 % dans le cas de calcul (cal 1 330)

deviennent de

1.26 % et 0.89 % pour le calcul (cal 1 410)

et

1.36 % et - 0.01 % pour le calcul (cal 1490).

On remarque que l'effet de damier inférieur à 0.7 % dans les deux premiers calculs (cal 1 330) et (cal 1410) devient plus important (1.4 %) dans le cas de calcul (cal 1 490).

En ce qui concerne les assemblages en périphérie les écarts varient

de - 5.97 % cas référence

à - 4.82 % et - 3.63 % dans les calculs (cal 1 410) et (cal 1 490).

c) Distribution de puissance

En dernier lieu, les distributions de puissance des deux calculs (cal 1 410) et (cal 1490) ont été comparées avec la distribution de puissance de calcul (1 330), tableaux (III.44) et (III.45).

On constate des écarts au centre du coeur de - 0.6 % et - 1.20 % respectivement dans chacun des cas (cal 1 410) et (cal 1 490) ; en périphérie ces écarts plus importants, sont de l'ordre de 1.5 % à 3 %.

Nous avons simulé par l'augmentation du bore soluble un accroissement de l'efficacité des poisons consommables, en augmentant l'absorption dans les assemblages empoisonnés ; il en résulte un aplatissement de la distribution de puissance.

III.3.2.2 - Conclusion

Ce test de sensibilité concernant le traitement de l'absorption des poisons consommables et par conséquent l'efficacité des grappes de poisons consommables aboutissent à trois conclusions :

- Ce test est dans un sens cohérent et favorable du point de vue des résultats :

  . Valeur propre : réduction de la dérive de réactivité constatée au cours du premier cycle.

  . Les écarts calcul-expérience des valeurs d'activité ont été améliorés, principalement, en périphérie où les valeurs d'activité sous-estimées donnaient les écarts les plus importants.

- Nous n'avons pas de certitude sur l'efficacité du poison consommable.

- Au vu des résultats de ce test, nous trouvons qu'une erreur éventuelle de 10 % sur l'efficacité des grappes de poisons consommables est excessive, car elle entraîne des effets supérieurs aux écarts constatés, par contre une erreur de l'ordre de 5 % peut être envisagée en compensant d'environ 350 pcm la dérive de réactivité au cours du premier cycle, elle conduit à une distribution de puissance aplatie réduisant ainsi les sous-estimations précédentes des valeurs d'activité dans les assemblages périphériques tout en respectant les mesures expérimentales au centre du coeur.

Calcul	Valeur propre
Cal 1330	1.00104
Cal 1410	0.99768 (-336 pcm)*
Cal 1490	0.99438 (-668 pcm)*

Tableau III. 40 _ Comparaison des valeurs propres entre les trois calculs de cœur : (cal 1330), (cal 1410) et (CAL 1490).

* Ecart par rapport au calcul (cal 1330).

Calcul	: C	*
Exp.	: E	*
(C-E)/E (%):		*

PLAN` 1
2D B1330

0. MWJ/T
0. % PN
1330. PPM

							0.7110 0.7548 -5.81							
									0.7838 0.8470 -7.46					
			0.5222 0.5704 -8.45			1.3316 1.2639 5.35	1.1089 1.0735 3.30				0.5222 0.5744 -9.09			
				0.8904 0.8811 1.06			1.3651 1.3416 1.75		1.2710 1.2945 -1.82					
		0.7537 0.7546 -0.13		1.2489 1.2215 2.25		1.3266 1.3199 0.50				1.2489 1.2640 -1.19	0.8904 0.9067 -1.80		0.5073 0.5468 -7.22	
				1.0144 0.9901 2.46			1.2917 1.3087 -1.30		1.3320 1.2511 6.47					
		1.3316 1.3062 1.95				1.2767 1.2344 3.43		1.2767 1.2723 0.34			1.0372 1.0102 2.67		0.8469 0.8632 -1.88	
0.7110 0.7103 0.09		1.1089 1.0683 3.80		0.9853 0.9665 1.94					1.2917 1.2652 2.10			1.1089 1.0556 5.04	1.2647 1.2532 0.92	
				1.3266 1.3057 1.60				1.2767 1.2810 -0.34	1.0186 0.9720 4.80					0.5394 0.52[illegible] -5[illegible]
		0.9320 0.9353 -0.36				1.0186 0.9946 2.41					1.2710 1.1991 5.99		0.7838 0.8168 -4.05	
				1.2489 1.2636 -1.16			0.9853 0.9388 4.95		1.0144 1.0030 1.14	1.2489 1.2596 -0.84				
		0.5222 0.5597 -6.70				1.0372 1.0485 -1.07					0.9604 1.0017 -4.12	0.5222 0.5599 -6.74		
							1.1089 1.0853 2.17		0.9320 0.9690 -3.82					
				0.5073 0.5576 -9.02				0.8469 0.8942 -5.29						
						0.5394 0.6118 -11.83								

TABLEAU III.41 - COMPARAISON DES ACTIVITÉS EXPÉRIMENTALES ET CALCULÉES À 1330 PPM DE BORE.

Calcul : C *
Exp. : E *
(C-E)/E (%): *

PLAN 1
2D B+80

0. MWJ/T
0. % PN
1410. PPM

							0.7319							
							0.7548							
							-3.03							
									0.7932					
									0.8470					
									-6.35					
			0.5260			1.3407	1.1043				0.5260			
			0.5704			1.2639	1.0735				0.5744			
			-7.78			6.07	2.87				-8.42			
				0.8796			1.3685		1.2708					
				0.8811			1.3416		1.2945					
				-0.17			2.00		-1.83					
		0.7464		1.2465		1.3266				1.2465	0.8796		0.5126	
		0.7546		1.2215		1.3199				1.2640	0.9067		0.5468	
		-1.09		2.05		0.50				-1.38	-2.99		-6.25	
				1.0024			1.2905		1.3300					
				0.9901			1.3087		1.2511					
				1.25			-1.39		6.30					
		1.3407				1.2746		1.2746			1.0276		0.8509	
		1.3062				1.2344		1.2723			1.0102		0.8632	
		2.64				3.26		0.18			1.72		-1.43	
0.7319		1.1043		0.9755					1.2905			1.1043	1.2868	
0.7103		1.0683		0.9665					1.2652			1.0556	1.2532	
3.04		3.37		0.93					2.00			4.61	2.68	
				1.3266				1.2746	1.0064					0.5530
				1.3057				1.2810	0.9720					0.5732
				1.60				-0.50	3.54					-3.52
		0.9250				1.0064					1.2708		0.7932	
		0.9353				0.9946					1.1991		0.8168	
		-1.10				1.18					5.98		-2.89	
				1.2465			0.9755		1.0024	1.2465				
				1.2636			0.9388		1.0030	1.2596				
				-1.35			3.91		-0.06	-1.04				
		0.5260				1.0276					0.9642	0.5260		
		0.5597				1.0485					1.0017	0.5599		
		-6.01				-1.99					-3.75	-6.05		
							1.1043		0.9250					
							1.0853		0.9690					
							1.75		-4.54					
				0.5126				0.8509						
				0.5576				0.8942						
				-8.06				-4.85						
						0.5530								
						0.6118								
						-9.60								

TABLEAU III.42 - COMPARAISON DES ACTIVITÉS EXPÉRIMENTALES ET CALCULÉES À 1410 PPM DE BORE.

Calcul . : C *
Exp. : E *
(C-E)/E (%): *

PLAN 1
2D B+160

0. MWJ/T
0. % PN
1490. PPM

							0.7536 0.7548 -0.15							
									0.8027 0.8470 -5.22					
			0.5298 0.5704 -7.12			1.3485 1.2639 6.69	1.0998 1.0735 2.45				0.5298 0.5744 -7.76			
				0.8692 0.8811 -1.36			1.3716 1.3416 2.23		1.2704 1.2945 -1.86					
		0.7394 0.7546 -2.02		1.2448 1.2215 1.91		1.3257 1.3199 0.44				1.2448 1.2640 -1.52	0.8692 0.9067 -4.14		0.5178 0.5468 -5.30	
				0.9903 0.9901 0.02			1.2887 1.3087 -1.53		1.3275 1.2511 6.10					
		1.3485 1.3062 3.24				1.2718 1.2344 3.04		1.2718 1.2723 -0.04			1.0187 1.0102 0.83		0.8551 0.8632 -0.94	
0.7536 0.7103 6.09		1.0998 1.0683 2.95		0.9655 0.9665 -0.11					1.2887 1.2652 1.86			1.0998 1.0556 4.18	1.3093 1.2532 4.48	
				1.3257 1.3057 1.53				1.2718 1.2810 -0.72	0.9935 0.9720 2.22					0.5679 0.5732 -0.92
		0.9181 0.9353 -1.84				0.9935 0.9946 -0.11					1.2704 1.1991 5.95		0.8027 0.8168 -1.73	
				1.2448 1.2636 -1.48			0.9655 0.9388 2.85		0.9903 1.0030 -1.27	1.2448 1.2596 -1.17				
		0.5298 0.5597 -5.34				1.0187 1.0485 -2.84					0.9677 1.0017 -3.39	0.5298 0.5599 -5.37		
							1.0998 1.0853 1.33		0.9181 0.9690 -5.25					
				0.5178 0.5576 -7.14				0.8551 0.8942 -4.37						
						0.5679 0.6118 -7.17								

TABLEAU III.43 - COMPARAISON DES ACTIVITÉS EXPÉRIMENTALES ET CALCULÉES À 1490 PPM DE BORE.

Ecart = $(P_{1410}/P_{1330})-1\%$

					0.23	0.59		
				-0.28	-0.89	-0.71	0.88	
			-0.35	-0.88	-0.18	-0.49	1.02	
		-0.36	-0.88	-0.26	-0.60	0.52	0.75	2.43
Assemblage central →	-0.29	-0.77	-0.27	-0.73	0.08	-0.16	1.56	2.81

Tableau III. 44 _ Comparaison des distributions de puissance entre les calculs (cal 1410) et (cal 1330).

Ecart = $(P_{1490}/P_{1330})-1\%$

					0.46	1.15		
				-0.65	-1.79	-1.41	1.76	
			-0.69	-1.84	-0.36	-0.88	2.07	
		-0.73	-1.84	-0.44	-1.20	0.96	1.49	4.95
Assemblage central →	-0.67	-1.72	-0.54	-1.46	0.17	-0.24	3.22	5.70

Tableau III. 45 _ Comparaison des distributions de puissance entre les calculs (cal 1490) et (cal 1330).

III.3.3 - Effet de l'ajustement des constantes de réflecteur sur les résultats du calcul de coeur

Nous cherchons dans ce paragraphe à déterminer l'influence d'un ajustement des constantes de réflecteur sur le calcul du coeur ; cette influence sera estimée à travers la valeur propre, la distribution de puissance, les valeurs d'activités et le taux de combustion.

Tenant compte du fait qu'en début de vie, les écarts calcul-expérience sont plus importants qu'aux autres pas d'irradiation, nous ferons l'ajustement des constantes de réflecteur en début de cycle, de façon à obtenir une carte calculée d'activité en accord avec les mesures expérimentales ; cet ajustement sera reproduit au long de l'évolution complète du cycle.

Nous rappelons que dans la carte d'activités calculée en début de cycle [tableau (II.21)] les écarts moyens dans les assemblages enrichis à 2.1 % et 2.6 % étaient respectivement de 0.93 % et 1.73 % et que l'écart moyen dans les assemblages périphériques s'élevait à - 5.61 %.

Pour éliminer cet écart calcul-expérience en périphérie, l'ajustement des constantes de réflecteur portera sur le coefficient de diffusion dans le groupe rapide D_1.

Le fait de diminuer D_1 augmente la valeur du flux en périphérie, et aura pour conséquence d'éliminer l'écart constaté avec l'expérience.

Nous avons effectué le calcul du coeur en faisant varier le paramètre D_1 pour en évaluer l'effet sur l'écart en périphérie : cet effet est linéaire. Ceci nous conduit à diminuer D_1 de 22 % afin de supprimer l'écart de - 5.61 %.

Le calcul du coeur par CRONOS a été effectué sous les mêmes conditions qu'au paragraphe [III.2.1] pour le cycle 1, mais en ajustant le réflecteur.

III.3.3.1 - Résultats et conclusions

a) Valeurs propres

Le tableau (III.46) nous donne les écarts en pcm sur les valeurs propres en évolution, entre les calculs sans et avec ajustement du réflecteur. On remarque un effet régulier de l'ordre de 100 à 150 pcm au long du cycle.

b) Valeurs d'activités

Nous avons cherché l'effet de l'ajustement des constantes de réflecteur sur les valeurs d'activités pour les trois pas d'irradiations suivants :

0,1173 et 14 979 MWj/T

représentant le début et la fin de cycle ; à 1 173 MWj/T le réacteur atteint la pleine puissance.

Pour ces trois valeurs d'irradiations, nous donnons les cartes d'activités calculées sans l'ajustement du réflecteur, tableaux (III.47a)(*) à (III.49a), ainsi que l'effet dû à l'ajustement, tableaux (III.47b) à (III.49b).

On note qu'en début de cycle, l'effet dû à l'ajustement du réflecteur sur les valeurs d'activités, tableaux (III.47b) est respectivement de - 1.58 %, - 0.90 % et 5.65 % pour les assemblages enrichis à 2.1 %, 2.6 % et les assemblages en périphérie ; ce qui revient à changer les écarts moyens calcul-expérience, [tableau (III.47a)], dans ces mêmes assemblages

(*) La légère différence des écarts calcul-expérience, entre les tableaux (III.47a) et (II.21) provient du fait que la puissance est prise à 5 % PN avec un titre en bore moyen de (600 ppm) au lieu de 1 330 ppm dans la réalité.

de 1.15 %, 1.79 % et - 5.97 % (cas sans ajustement)

à - 0.43 %, 0.89 % et - 0.32 %.

Au pas d'irradiation 1 173 MWj/T, l'effet est moindre, tableau (III.48b) : - 1.03 %, - 0.66 % et 4.37 % ; les écarts moyens calcul-expérience [tableau (III.48a)] changent

de 0.44 %, 1.29 % et - 3.68 % (cas sans ajustement)

à - 0.59 %, 0.63 % et 0.69 %.

En fin de cycle, l'effet devient plus faible, tableau (III.49b) : - 0.08 %, - 0.38 % et 0.94 % ; les écarts moyens calcul-expérience [tableau (III.49a)] varient

de 0.57 %, - 0.17 % et - 1.02 % (cas sans ajustement)

à 0.49 %, - 0.55 % et - 0.08 %.

L'effet de damier passe respectivement de :

0.64 %, 0.85 % et 0.74 %

pour les pas d'irradiations : 0, 1 173 et 14 979 MWj/T

à 1.32 %, 1.20 % et 1.04 %.

c) Distribution de puissance

L'influence de l'ajustement des constantes de réflecteur sur la distribution de puissance est donnée dans les tableaux (III.50) à (III.52) pour les mêmes pas d'irradiations.

La diminution du coefficient de diffusion D_1 du réflecteur dans le groupe rapide a pour conséquence une diminution des fuites, qui entraîne

une augmentation du flux en périphérie, et simultanément une diminution de celui-ci au centre du coeur. Il en résulte un aplatissement de la distribution de puissance en début de cycle, traduit par des écarts de - 2 % à - 5 % au centre, atteignant 4 % à 8 % en périphérie, [tableau (III.50)], entre la distribution de puissance "ajustée" et la distribution de puissance "non ajustée".

En évolution, l'effet de correction des constantes de réflecteur sur la distribution de puissance devient moins important. A 1 173 MWj/T, l'effet au centre est de l'ordre de - 2 % et 4 % en périphérie.

En fin de cycle, la correction apportée au réflecteur n'entraîne que des écarts de l'ordre de ± 1 %.

d) Taux de combustion

L'effet sur les taux de combustion est aussi lié à l'aplatissement de la distribution de puissance dû à l'ajustement du réflecteur. En début de vie, à 1 173 MWj/T, il est de l'ordre de - 1 % à - 3 % au centre et de 3 % à 6 % en périphérie, [tableau (III.53)], et de - 1 % au centre et de 2 % à 4 % en périphérie en fin de cycle [tableau (III.54)].

Cette modification de la distribution des taux de combustion entre le centre et la périphérie explique la réduction progressive constatée de l'effet de l'ajustement du réflecteur sur les distributions d'activités au cours du cycle. L'effet sur les taux de combustion a également une influence, après repositionnement, sur la distribution de puissance en début de deuxième cycle.

Irradiation (MWJ/T)	Ecart sur la valeur propre (pcm)*
0	113
280	102
500	99
1173	102
2748	110
4000	111
5363	118
6500	120
7755	128
9000	130
10844	147
13340	161
14979	162

Tableau III.46 _ Effet de l'ajustement des constantes de réflecteur sur la valeur propre.

* Ecart par rapport au calcul sans ajustement.

Calcul : C *
Exp. : E *
(C-E)/E (%): *

PLAN 1
2D CR

0. MWJ/T
5. % PN
1325. PPM

							0.7106 0.7548 -5.85							
									0.7833 0.8470 -7.52					
			0.5225 0.5704 -8.40			1.3317 1.2639 5.36	1.1086 1.0735 3.27				0.5225 0.5744 -9.04			
				0.8902 0.8811 1.03			1.3655 1.3416 1.78		1.2712 1.2945 -1.80					
		0.7535 0.7546 -0.15		1.2491 1.2215 2.26		1.3282 1.3199 0.62				1.2491 1.2640 -1.18	0.8902 0.9067 -1.83		0.5073 0.5468 -7.21	
				1.0145 0.9901 2.47			1.2923 1.3037 -1.25		1.3329 1.2511 6.54					
		1.3317 1.3062 1.95				1.2764 1.2344 3.40		1.2764 1.2723 0.32			1.0368 1.0102 2.63		0.8454 0.8632 -2.06	
0.7106 0.7103 0.04		1.1086 1.0683 3.77		0.9863 0.9665 2.05					1.2923 1.2652 2.15			1.1086 1.0556 5.02	1.2639 1.2532 0.85	
				1.3282 1.3057 1.72				1.2764 1.2810 -0.36	1.0184 0.9720 4.77					0.5394 0.5732 -5.90
		0.9314 0.9353 -0.42				1.0184 0.9946 2.39					1.2712 1.1991 6.02		0.7833 0.8168 -4.10	
				1.2491 1.2636 -1.15			0.9863 0.9368 5.06		1.0145 1.0030 1.15	1.2491 1.2596 -0.83				
		0.5225 0.5597 -6.65				1.0368 1.0485 -1.11					0.9608 1.0017 -4.08	0.5225 0.5599 -6.68		
							1.1086 1.0353 2.14		0.9314 0.9690 -3.89					
				0.5073 0.5576 -9.01				0.8454 0.8942 -5.46						
						0.5394 0.6118 -11.83								

TABLEAU III.47A - COMPARAISON DES ACTIVITÉS EXPÉRIMENTALES ET CALCULÉES AVEC EFFETS DE CONTRE-RÉACTION À 0 MWJ/T SANS AJUSTEMENT DES CONSTANTES DE RÉFLECTEUR.

							7.2							
									4.8					
			5.3			0.7	0.5				5.3			
				0.2			-1.4		-0.7					
		2.7		-1.3		-2.6				-1.3	0.2		6.9	
				-2.2			-3.7		-3.1					
		0.7				-4.1		-4.1			-1.2		3.4	
7.2		0.5		-2.8					-3.7			0.5	3.0	
				-2.6				-4.1	-3.6					8.1
		1.4				-3.6					-0.7		4.8	
				-1.3			-2.8		-2.2	-1.3				
		5.3				-1.2					2.0	5.3		
							0.5		1.4					
				6.9				3.4						
						8.1								

Ecart = $(A_{aj}/A) - 1\%$

Tableau III.47b – Effet de l'ajustement des constantes de réflecteur sur les valeurs d'activités en début de cycle.

CALCUL : C *
EXP : E *
(C-E)/E (%): *

PLAN 1
2D CR

1173. MWJ/T
100. % PN
898. PPM

							0.6477 0.6686 -3.11							
									0.7308 0.7558 -3.31					
			0.5317 0.5601 -5.06			1.2726 1.2718 0.07	1.0524 1.0305 2.13				0.5317 0.5663 -6.11			
				0.9019 0.8975 0.49			1.3543 1.3522 0.16		1.2733 1.2705 0.22					
		0.7342 0.7233 1.50		1.2747 1.2650 0.77		1.3638 1.3570 0.50				1.2747 1.2768 -0.17	0.9019 0.9025 -0.06		0.4971 0.5225 -4.86	
				1.0419 1.0234 1.80			1.3676 1.3696 -0.15		1.3795 1.3699 0.69					
		1.2726 1.2551 1.40				1.3657 1.3622 0.25		1.3657 1.3523 0.99			1.0364 1.0248 1.14		0.7781 0.7829 -0.62	
0.6477 0.6642 -2.48		1.0524 1.0203 3.15		1.0295 1.0234 0.60					1.3676 1.3460 1.60			1.0524 1.0153 3.66	1.1667 1.1557 0.95	
				1.3638 1.3624 0.10				1.3657 1.3494 1.20	1.0727 1.0537 1.80					0.5068 0.5302 -4.43
		0.9045 0.9031 0.16				1.0727 1.0603 1.17					1.2733 1.2615 0.94		0.7308 0.7507 -2.66	
				1.2747 1.2778 -0.24			1.0295 1.0222 0.71		1.0419 1.0297 1.19	1.2747 1.2639 0.85				
		0.5317 0.5640 -5.71				1.0364 1.0304 0.58					0.9836 1.0008 -1.72	0.5317 0.5611 -5.24		
							1.0524 1.0276 2.41		0.9045 0.9074 -0.32					
				0.4971 0.5239 -5.11				0.7781 0.7977 -2.45						
						0.5068 0.5368 -5.59								

TABLEAU III.48A - COMPARAISON DES ACTIVITÉS EXPÉRIMENTALES ET CALCULÉES AVEC EFFETS DE CONTRE-RÉACTION À 1173 MWJ/T SANS AJUSTEMENT DES CONSTANTES DE RÉFLECTEUR.

							5.3							
									3.6					
			4.4			0.3	0.1				4.4			
				0.1			-1.0		-0.6					
		1.9		-0.9		-1.7				-0.9	0.1		5.6	
				-1.4			-2.3		-1.9					
		0.3				-2.6		-2.6			-0.9		2.2	
5.3		0.1		-1.9					-2.3			0.1	1.8	
				-1.7				-2.6	-2.2					6.3
		0.8				-2.2					-0.6		3.6	
				-0.9			-1.9		-1.4	-0.9				
		4.4				-0.9					1.5	4.4		
							0.1		0.8					
				5.6				2.2						
						6.3								

Ecart = $(A_{aj} / A) - 1\%$

Tableau III. 48 b _ Effet de l'ajustement des constantes de réflecteur sur les valeurs d'activités à 1173 MWJ / T.

CALCUL : C	*
EXP : E	*
(C-E)/E (%) :	*

PLAN 1
2D CR

14979. MWJ/T
100. % PN
19. PPM

							0.6536 0.6554 -0.28							
									0.7741 0.7854 -1.43					
			0.6127 0.6120 0.12			1.2120 1.1976 1.20	1.0559 1.0455 0.99				0.6127 0.6236 -1.75			
				1.0267 1.0200 0.66			1.2426 1.2338 0.72		1.2403 1.2311 0.74					
		0.8620 0.8539 0.95		1.2394 1.2268 1.03		1.2449 1.2362 0.71				1.2394 1.2336 0.47	1.0267 1.0291 -0.24		0.5683 0.5737 -0.93	
				1.0625 1.0576 0.47			1.2394 1.2380 0.11		1.2426 1.2302 1.01					
		1.2120 1.1946 1.45				1.2372 1.2377 -0.04		1.2372 1.2314 0.47			1.0601 1.0664 -0.59		0.8372 0.8492 -1.42	
0.6536 0.6547 -0.17		1.0559 1.0462 0.92		1.0402 1.0626 -2.11					1.2394 1.2357 0.29			1.0559 1.0363 1.89	1.1126 1.1065 0.55	
				1.2449 1.2477 -0.23				1.2372 1.2398 -0.21	1.0576 1.0619 -0.41					0.5417 0.5486 -1.26
		1.0120 1.0176 -0.55				1.0576 1.0643 -0.63					1.2403 1.2293 0.89		0.7741 0.7789 -0.62	
				1.2394 1.2392 0.01			1.0402 1.0621 -2.07		1.0625 1.0674 -0.46	1.2394 1.2268 1.02				
		0.6127 0.6261 -2.13				1.0601 1.0732 -1.22					1.0561 1.0504 0.55	0.6127 0.6175 -0.77		
							1.0559 1.0425 1.28		1.0120 1.0185 -0.64					
				0.5683 0.5755 -1.25				0.8372 0.8528 -1.83						
						0.5417 0.5555 -2.48								

TABLEAU III.49A - COMPARAISON DES ACTIVITÉS EXPÉRIMENTALES ET CALCULÉES AVEC EFFETS DE CONTRE-RÉACTIONS À 14 979 MWJ/T SANS AJUSTEMENT DES CONSTANTES DE RÉFLECTEUR.

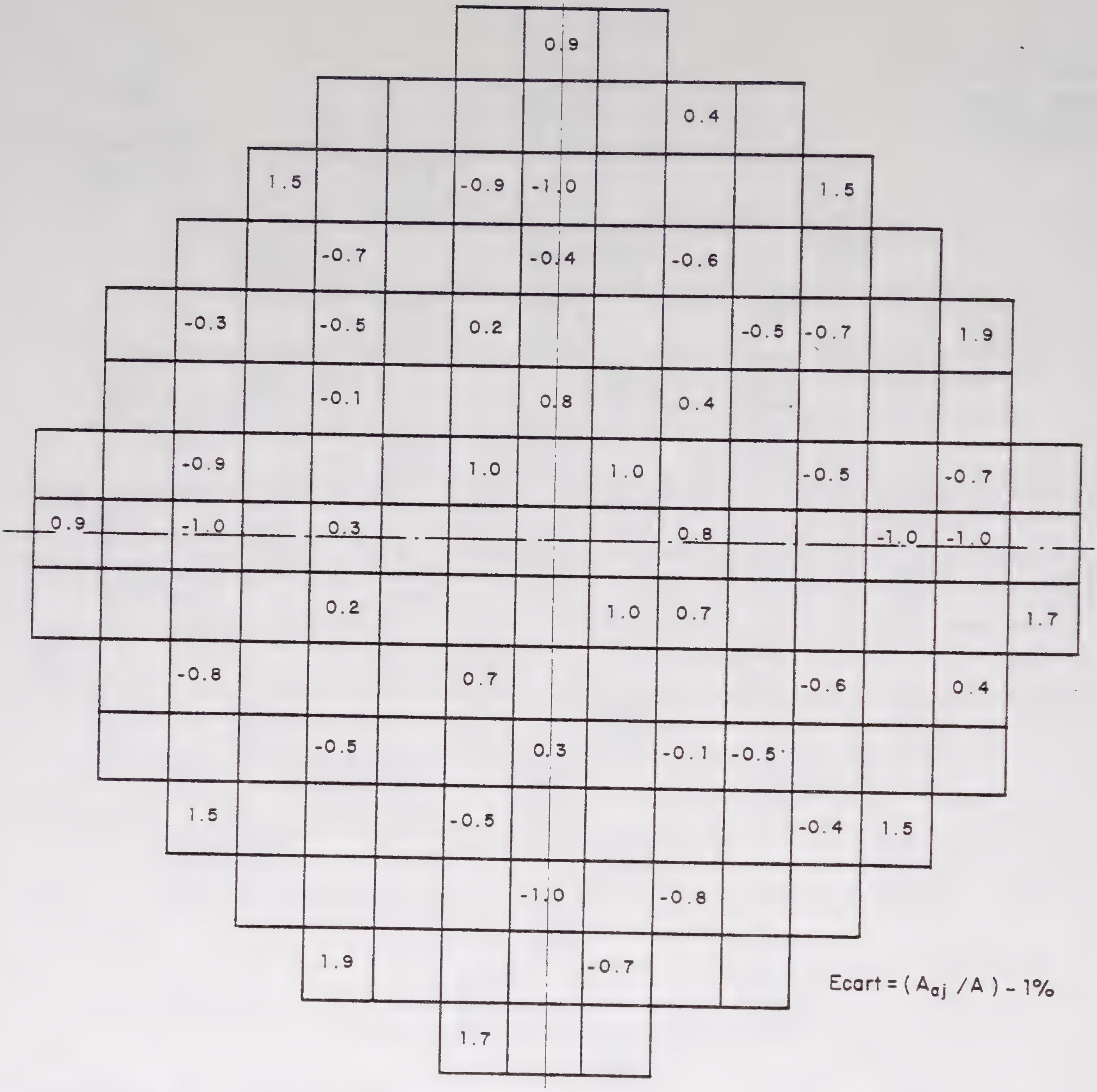


Tableau III. 49 b _ Effet de l'ajustement des constantes de réflecteur sur les valeurs d'activités en fin de cycle.

Ecart = $(P_{aj}/P) - 1\%$

					1.64	4.72		
				-1.67	-0.14	2.26	6.32	
			-3.41	-2.47	-1.10	1.07	4.35	
		-4.48	-3.96	-2.99	-1.56	0.26	3.07	7.49
Assemblage central →	-4.90	-4.66	-4.16	-3.11	-1.71	0.08	2.67	6.66

Tableau III.50 _ Effet de l'ajustement des constantes de réflecteur sur la distribution de puissance en début de cycle.

Ecart = $(P_{aj}/P) - 1\%$

					1.33	4.05		
				-1.17	-0.10	1.71	5.31	
			-2.23	-1.69	-0.81	0.62	3.35	
		-2.85	-2.47	-2.01	-1.19	0.09	2.05	5.95
Assemblage central →	-3.10	-3.04	-2.59	-2.07	-1.27	-0.08	1.59	5.03

Tableau III.51 _ Effet de l'ajustement des constantes de réflecteur sur la distribution de puissance à 1173 MWJ/T.

Ecart = $(P_{aj}/P) - 1\%$

					-0.41	1.33		
				-0.46	-0.72	-0.39	1.87	
			0.47	-0.09	-0.65	-0.82	0.29	
		1.13	0.70	0.19	-0.43	-0.95	-0.78	1.58
Assemblage central →	1.31	1.14	0.84	0.26	-0.37	-0.97	-1.11	0.69

Tableau III. 52 _ Effet de l'ajustement des constantes de réflecteur sur la distribution de puissance en fin de cycle.

Ecart = $(\tau_{aj}/\tau) - 1\%$

					1.52	4.40		
				-1.24	-0.09	1.94	5.56	
			-2.60	-1.99	-0.93	0.68	3.66	
		-3.27	-2.97	-2.33	-1.39	0.08	2.32	6.34
Assemblage central →	-3.55	-3.51	-3.10	-2.43	-1.52	-0.07	1.87	5.48

Tableau III. 53 _ Effet de l'ajustement des constantes de réflecteur sur le taux de combustion à 1173 MWJ/T.

Ecart = $(\tau_{aj} / \tau) - 1\%$

					0.61	3.01		
				-0.85	-0.38	0.90	3.97	
			-1.21	-1.07	-0.67	0.00	2.12	
		-1.44	-1.38	-1.16	-0.85	-0.31	1.02	4.32
Assemblage central →	-1.57	-1.52	-1.38	-1.30	-1.00	-0.40	0.62	3.46

Tableau III. 54 _ Effet de l'ajustement des constantes de réflecteur sur le taux de combustion en fin de cycle.

III.4 - CALCUL DU COEUR A TROIS DIMENSIONS EN DEBUT DE CYCLE

Nous avons effectué le calcul du coeur en début de cycle, à 5 % PN et taux de combustion nul, à trois dimensions, avec couplage thermohydraulique, dans le but de faire la comparaison calcul-expérience pour les 50 points de mesures sur les 57 plans axiaux, et de déterminer l'effet 2D/3D sur la distribution radiale de puissance ainsi que sur les valeurs d'activités intégrées sur la hauteur.

Le calcul a été réalisé à 2 groupes (avec coupure thermique à 0.625 eV) les polynômes d'interpolation représentant le flux sont toujours "Cubique Lagrange (CL16)" en x et y et linéaires en z.

Nous avons défini 20 éléments de découpage axial, dont 16 dans la partie fissile et chaque assemblage est représenté par (2x2) éléments. Pour les calculs thermohydrauliques, les points de calculs axiaux sont ceux qui délimitent les éléments de découpage défini pour la partie neutronique.

Les constantes homogènes des réflecteurs inférieur et supérieur ont été calculées à une concentration moyenne de bore de 600 ppm à une température d'eau de 286°C et 326°C respectivement dans les deux cas [28].

Le calcul est effectué avec les barres de contrôle "groupe D" insérées à 26.29 cm.

III.4.1 - Interprétation des résultats

III.4.1.1 - Comparaison des valeurs d'activités entre l'expérience et le calcul

a) Valeurs d'activités intégrées sur la hauteur

Dans le tableau (III.55), nous présentons les valeurs d'activités calculées, les valeurs des mesures ainsi que les écarts calculs-expériences.

On observe :

- Des écarts moyens de 0.65 % et 1.43 % dans les assemblages enrichis à 2.1 % et à 2.6 % du centre.

- Un écart moyen de - 4.07 % dans les assemblages périphériques.

- Un effet de damier de 0.78 %.

Il faut souligner que si nous corrigeons les valeurs d'activités calculées par l'effet de titre en bore (les bibliothèques sont préparées à titre en bore moyen, 600 ppm, et non à 1 330 ppm) et les valeurs d'activités expérimentales par l'effet de mesure, on obtient les mêmes écarts calcul-expérience qu'au chapitre II [tableau II.39].

b) Valeurs axiales d'activités

Pour faire la comparaison des distributions axiales d'activités théoriques et expérimentales dans les cinquante assemblages du coeur instrumentés, nous avons normalisé axialement les points de mesure dans chacun de ces assemblages instrumentés.

Nous représentons, dans la figure III.2 les positions de ces assemblages dans le coeur en indiquant leur enrichissement respectif, ainsi que la numérotation adopté lors du tracé axial.

Pour éviter de représenter les cinquante tracés axiaux, nous ne retiendrons qu'un seul représentant d'un groupe d'assemblages homologues c'est-à-dire occupant des positions symétriques dans le coeur, et ce, pour chaque type de groupe d'assemblages (enrichissement, nombre de poisons consommables). Nous avons aussi séparé les assemblages périphériques enrichis à 3.1 %, en deux types, selon qu'ils ont deux faces communes avec le réflecteur ou bien une face commune.

Nous sommes ainsi en possession d'une série réduite de 21 tracés axiaux, figures III.3 à III.23, représentant les types d'assemblages suivants :

- 8 types d'assemblages fonction de l'enrichissement, du nombre de poisons consommables et des faces en contact avec le réflecteur

  . 2.1 % sans poison (pavés 17, 27)
  . 2.6 %, 12 crayons de poison (pavés 5, 25, 28, 46)
  . 2.6 %, 16 crayons de poison (pavés 22, 43)
  . 2.6 %, 20 crayons de poison (pavés 26, 39)
  . 3.1 % sans poison, une face commune avec le réflecteur (pavés 1, 24)
  . 3.1 % sans poison, deux faces communes avec le réflecteur (pavés 3, 6, 42, 45)
  . 3.1 %, 12 crayons de poison (pavé 10)
  . 3.1 %, 16 crayons de poison (pavés 23, 49)

- 1 type d'assemblage avec barres de contrôle (pavés 18, 29).

La comparaison des distributions axiales d'activités théoriques et expérimentales fait apparaître deux catégories de résultats : pour une trentaine d'assemblages, l'accord entre le calcul et l'expérience paraît excellent, une fois prise en compte l'influence des grilles. Dans une vingtaine d'assemblages apparaît un décalage d'environ 3 cm.

Ce décalage est indépendant du type et de la position de l'assemblage ; pour des séries d'assemblages homologues symétriques, on compte des assemblages dans chacune de ces deux catégories (par exemple, pour les pavés homologués 3, 6, 42, 45 on compte deux assemblages dans chaque catégorie).

Il s'agit donc d'un problème de recalage de la cote de référence des mesures.

La comparaison des espacements théoriques des grilles avec l'évaluation que l'on peut en faire à partir des tracés expérimentaux d'activités ne laisse pas apparaître de divergence (figure III.24).

Par contre, si on superpose les centres des grilles dessinées à partir des cartes expérimentales d'activités, sur les positions théoriques de ces grilles dans l'assemblage, on s'aperçoit que le haut du coeur se trouve décalé d'environ 3.2 cm entre par exemple le cas du pavé 1 d'une part et celui du pavé 3 d'autre part (figure III.25).

Le positionnement théorique du haut du coeur par rapport au premier point de mesure serait plutôt en accord avec les courbes de la seconde catégorie faisant apparaître un léger écart entre le calcul et l'expérience (figure III.25).

Néanmoins cet argument n'est pas déterminant ; nous avons effectué le tracé continu de la distribution axiale d'activités passant par les points de mesure, pour les pavés 1 et 3 (figures III.26 et III.27) avec trois tendances différentes :

- La première en accord avec la position des grilles par rapport au combustible telle qu'on peut la déduire des cotes de conception de l'assemblage combustible.

- La seconde décalant les grilles au maximum (3.21 cm) par rapport à leur position précédente.

- La troisième intermédiaire, en ne décalant les grilles que de 1.6 cm.

Le premier et le troisième tracé paraissent les plus fondés.

Il serait nécessaire de départager les deux séries de mesures, mais la statistique ne le permet pas sur ce seul cas. Une information complémentaire sur les conditions expérimentales et une analyse d'un plus grand nombre de configurations semblent nécessaires, en particulier en évolution.

De toute façon, le recalage des tracés à moins d'un pas (ou 2 cm) paraît difficile à atteindre, compte tenu de la difficulté à situer par le dessin, le centre des grilles.

En dehors de ce décalage, on remarque une surestimation de la puissance vers le haut du coeur, dans les assemblages où les barres sont insérées, (figures III.22 et III.23), ce qui est dû au fait que pour des raisons de commodité de maillage de calcul, nous n'avons enfoncé les barres que de 26.29 cm au lieu de 39.19 cm.

On note aussi une erreur systématique sur le point extrême de calcul en bas du coeur ; il semble qu'on surestime la remontée du flux thermique au voisinage du réflecteur.

A l'avenir il serait utile de prendre en compte dans le dépouillement des résultats, l'influence des grilles sur la courbe théorique d'activité et de tenir compte des deux remarques précédentes.

III.4.1.2 - Etude de l'effet 2D/3D en début de cycle

Nous avons étudié, par la comparaison des résultats des calculs à deux et à trois dimensions au même taux d'irradiation (0 MWj/T), et même niveau de puissance (5 % PN), l'effet dû à la prise en compte de la description axiale du coeur en début de cycle.

a) Valeur propre

Les valeurs propres de ces deux calculs sont données dans le tableau (III.56), on note un écart de - 76 pcm.

b) Distribution de puissance

Les distributions radiales de puissance ont été comparées, tableau (III.57), nous constatons des écarts de l'ordre de 1 % à 2 % au centre et plus importants en périphérie atteignant - 1 % à - 3 %.

c) Valeurs d'activités

Les écarts entre les valeurs d'activités (*) issues des deux calculs de coeur figurent dans le tableau (III.58).

(*) Valeurs d'activité intégrées sur la hauteur à chaque point de mesure pour le calcul à trois dimensions.

On note :

- Des écarts moyens de l'ordre de 0.50 % et 0.36 % dans les assemblages enrichis à 2.1 % et à 2.6 %.

- Un écart de l'ordre de - 1.90 % en périphérie.

- Un effet de damier de 0.14 %.

d) Conclusion

La comparaison des résultats des calculs à deux et à trois dimensions montre l'influence de la représentation de la composante axiale du coeur. La distribution de puissance est aplatie, ce qui réduit les écarts calcul-expérience des valeurs d'activités, surtout à la périphérie du coeur où ces écarts sont les plus importants.

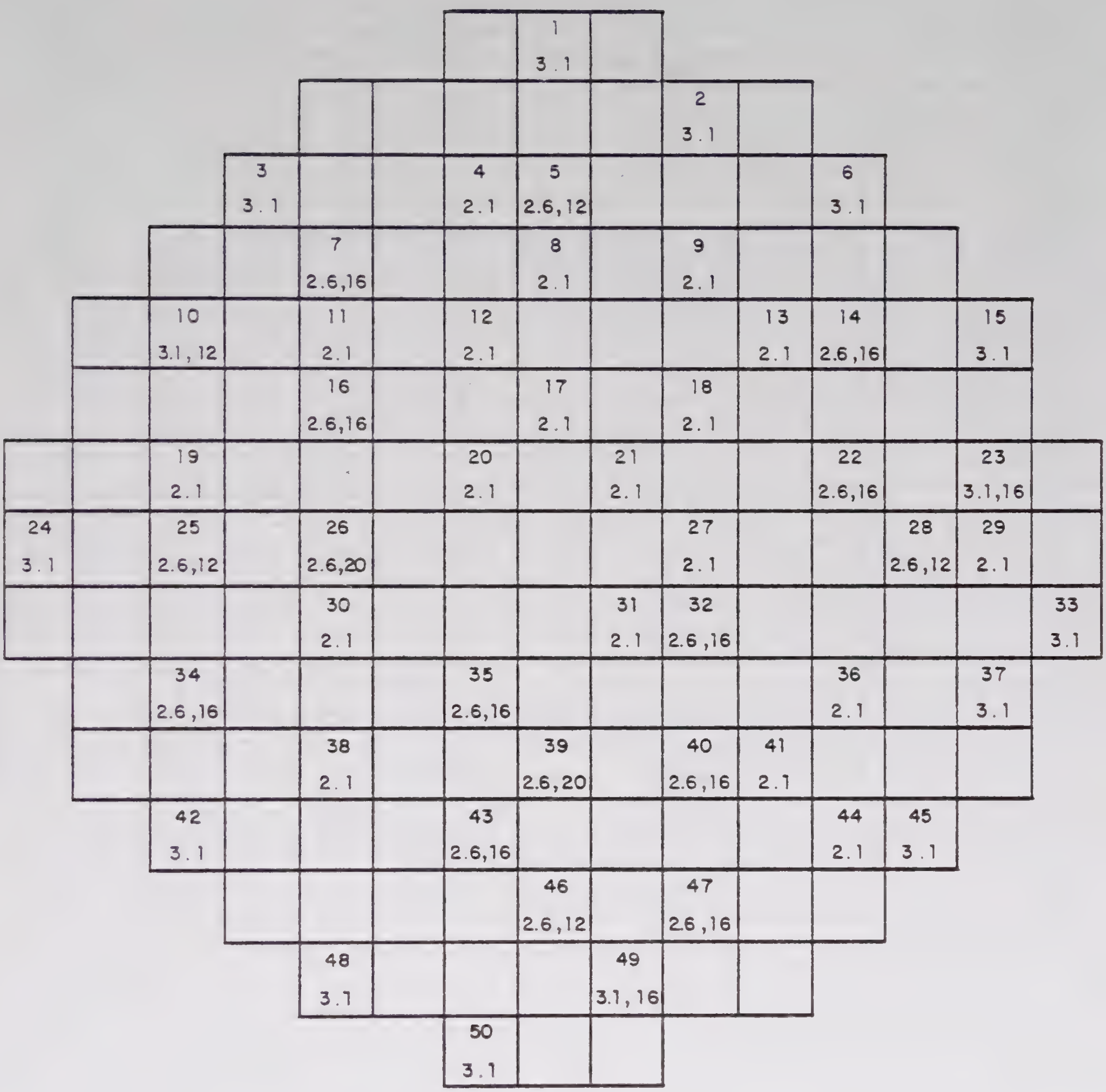
CALCUL : C *
EXP : E *
(C-E)/E (%): *

ZONE 2
3D CR

0. MWJ/T
5. % PN
1325. PPM

							0.7248 0.7550 -4.00							
									0.7967 0.8460 -5.82					
			0.5351 0.5704 -6.19			1.3327 1.2639 5.44	1.1081 1.0734 3.23				0.5351 0.5738 -6.75			
				0.8917 0.8812 1.19			1.3581 1.3403 1.33		1.2683 1.2928 -1.89					
		0.7620 0.7549 0.94		1.2442 1.2212 1.88		1.3161 1.3188 -0.20				1.2442 1.2646 -1.62	0.8917 0.9057 -1.55		0.5205 0.5461 -4.68	
				1.0072 0.9905 1.69			1.2773 1.3081 -2.35		1.3202 1.2551 5.19					
		1.3327 1.3059 2.05				1.2597 1.2348 2.02		1.2597 1.2730 -1.05			1.0314 1.0100 2.13		0.8539 0.8632 -1.08	
0.7248 0.7104 2.02		1.1081 1.0689 3.66		0.9772 0.9663 1.13					1.2773 1.2651 0.97			1.1081 1.0567 4.86	1.2738 1.2569 1.34	
				1.3161 1.3059 0.78				1.2597 1.2794 -1.54	1.0063 0.9710 3.64					0.5532 0.5735 -3.53
		0.9358 0.9351 0.08				1.0063 0.9952 1.12					1.2683 1.1989 5.79		0.7967 0.8160 -2.36	
				1.2442 1.2643 -1.59			0.9772 0.9383 4.14		1.0072 1.0028 0.44	1.2442 1.2592 -1.19				
		0.5351 0.5594 -4.34				1.0314 1.0487 -1.65					0.9711 1.0016 -3.04	0.5351 0.5598 -4.41		
							1.1081 1.0862 2.02		0.9358 0.9681 -3.33					
				0.5205 0.5576 -6.66				0.8539 0.8940 -4.48						
						0.5532 0.6123 -9.64								

TABLEAU IV.55 - COMPARAISON DES ACTIVITÉS EXPÉRIMENTALES ET CALCULÉES PAR CRONOS 3D À 0 MWJ/T.



X	Numéro de pavé.
X	Enrichissement et nombre de poison consommable.

Figure III. 2 _ Positions des assemblages instrumentés et numérotation des pavés.

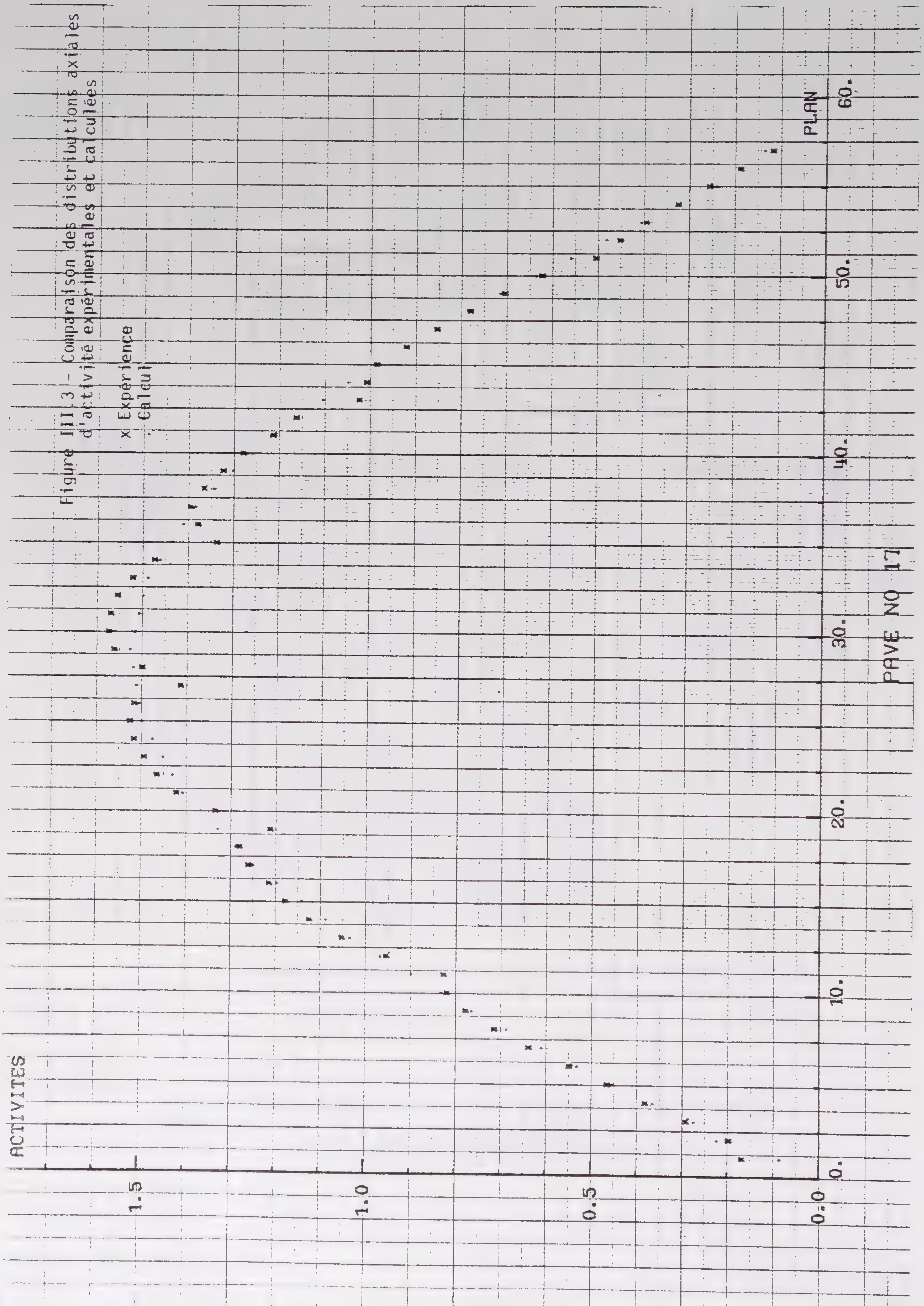


Figure III.3 - Comparaison des distributions axiales d'activité expérimentales et calculées

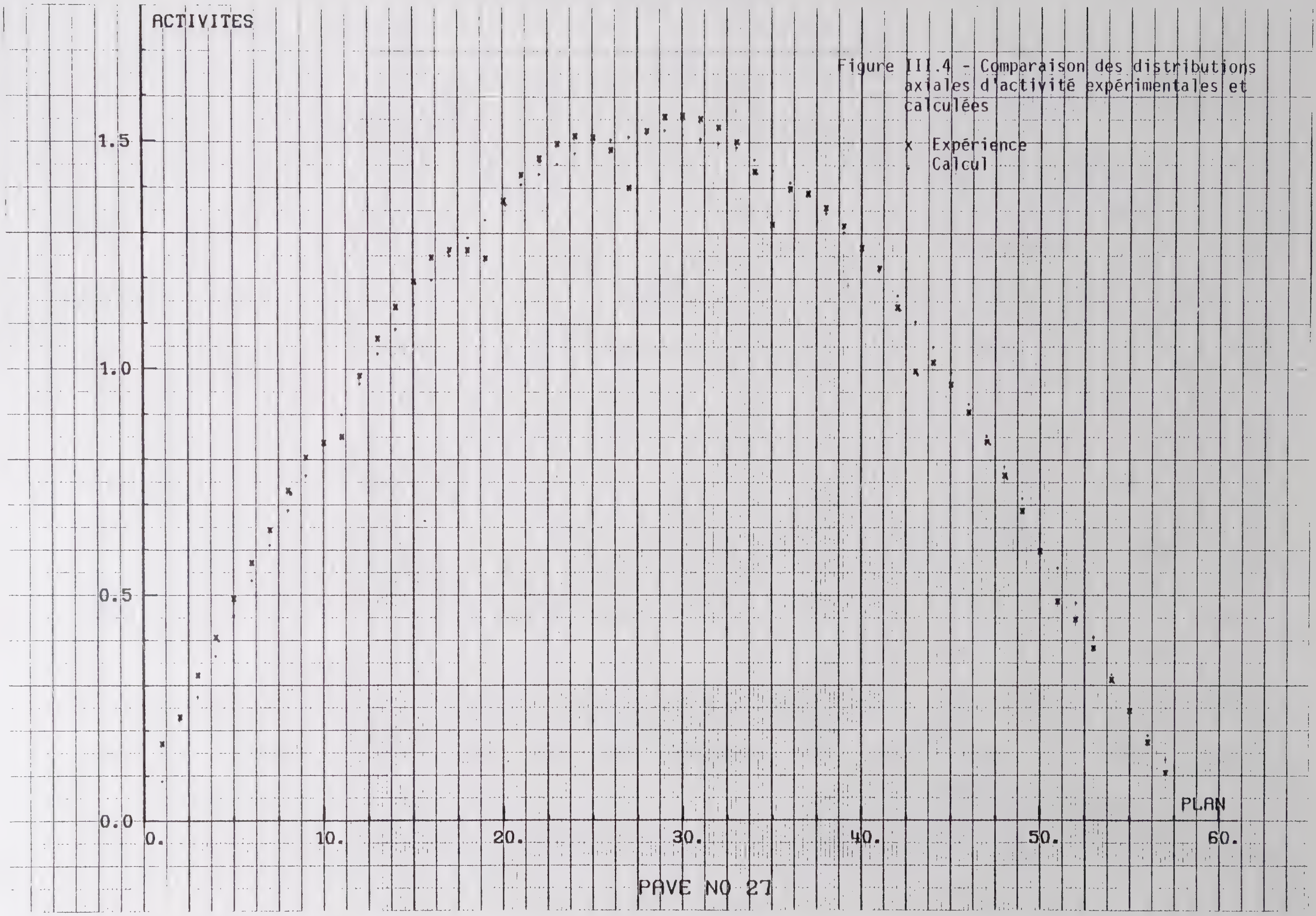


Figure III.4 - Comparaison des distributions axiales d'activité expérimentales et calculées

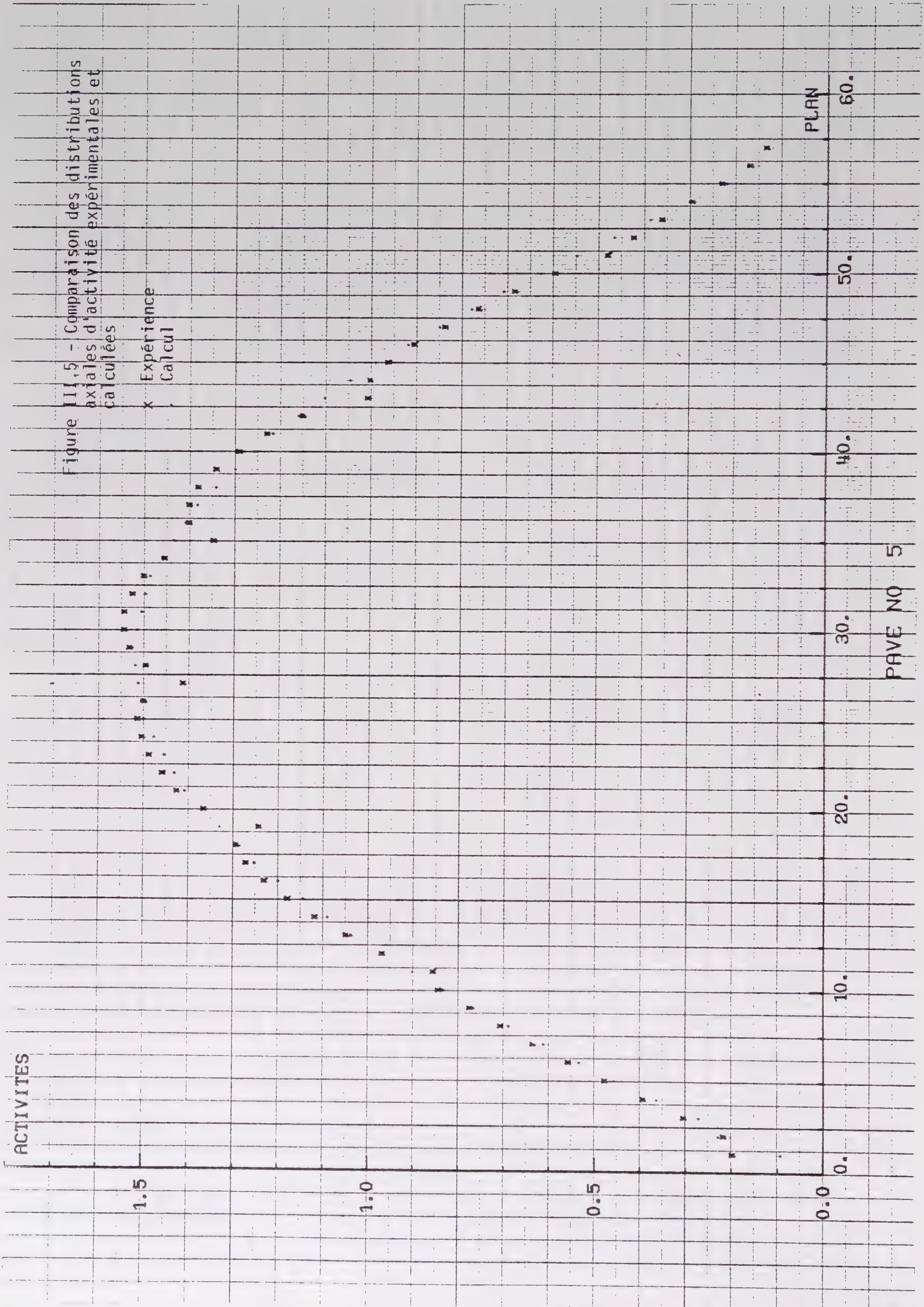


Figure III.5 - Comparaison des distributions axiales d'activité expérimentales et calculées

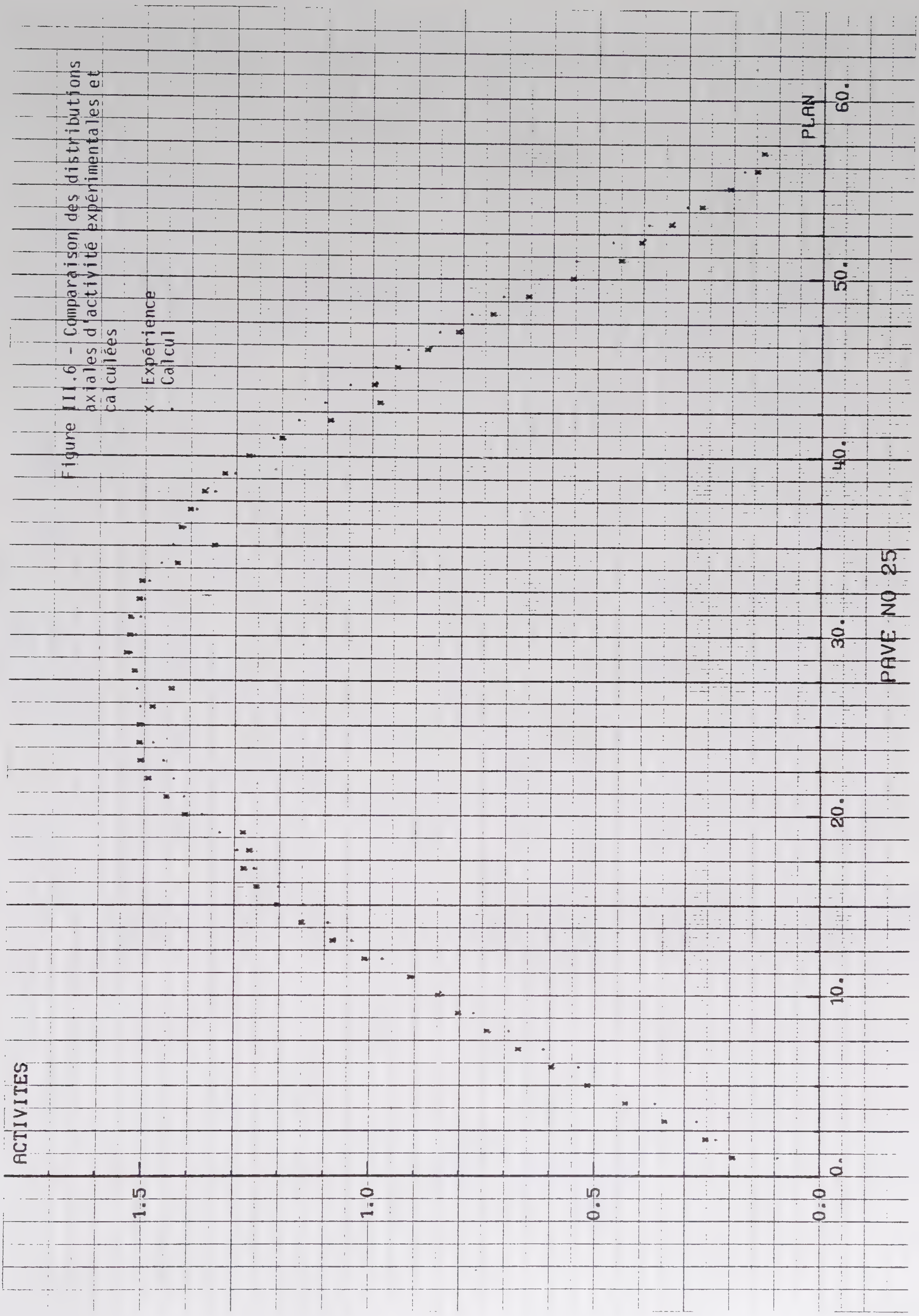


Figure III.6 - Comparaison des distributions axiales d'activité expérimentales et calculées

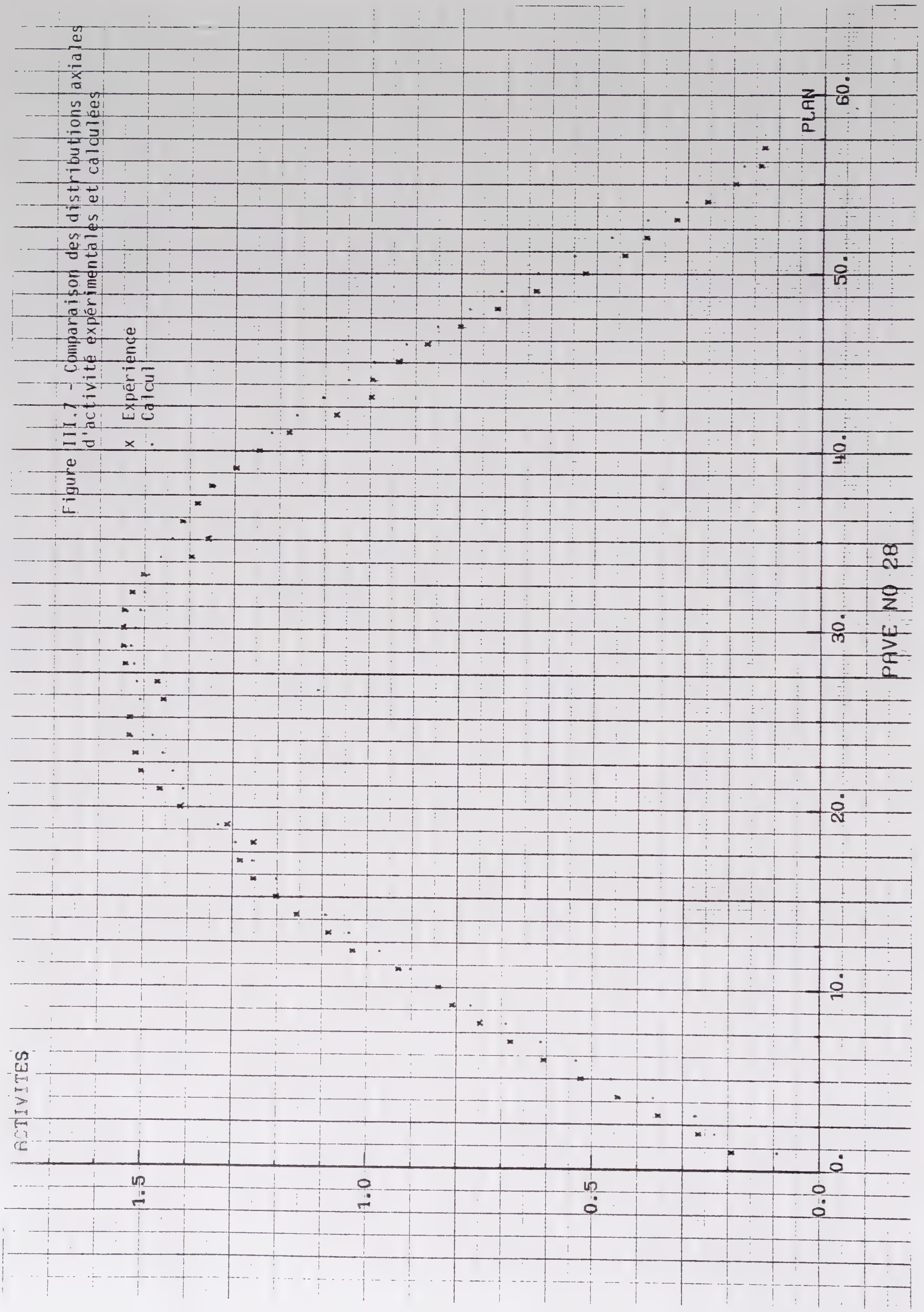


Figure III.7 - Comparaison des distributions axiales d'activité expérimentales et calculées

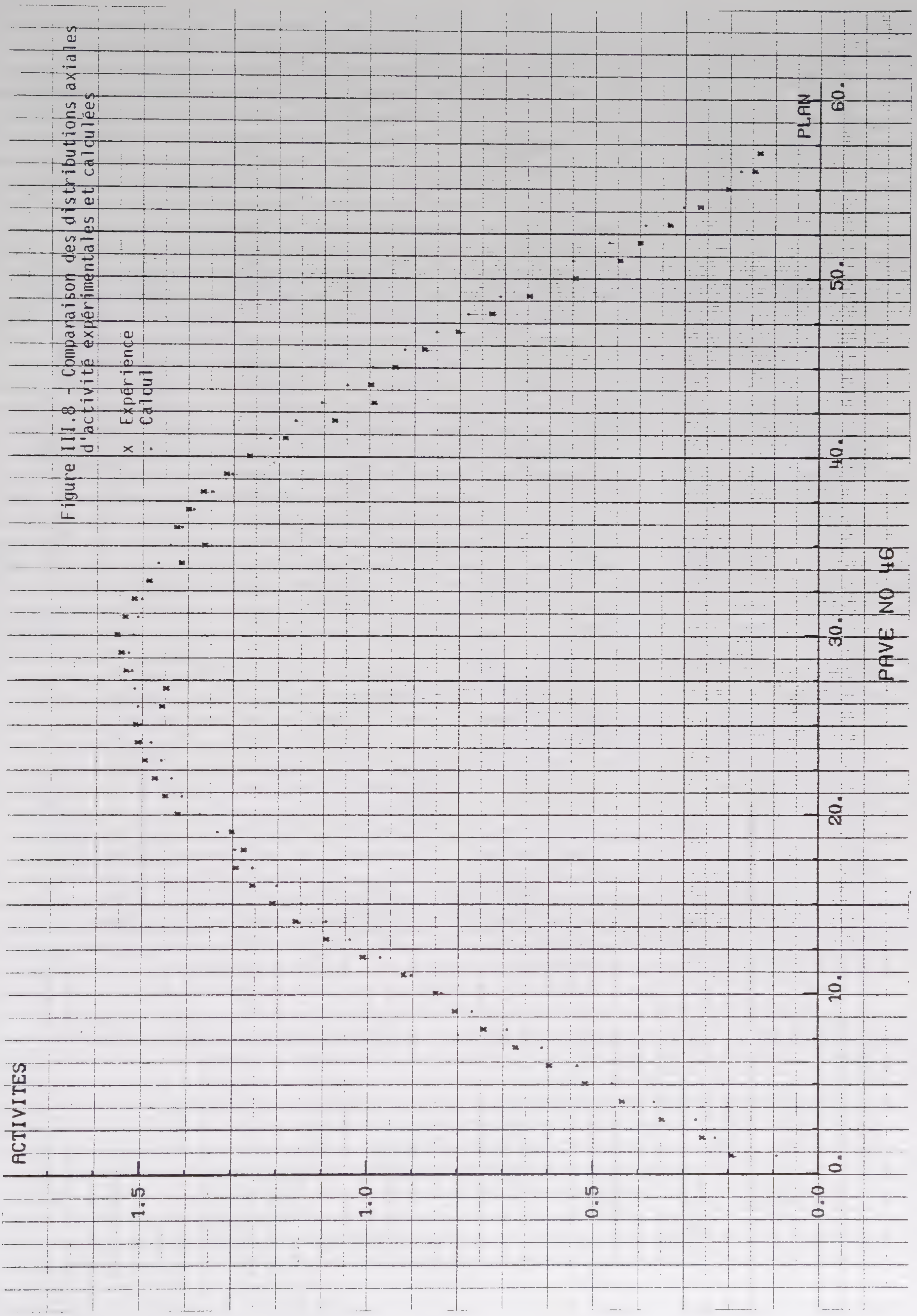


Figure III.8 - Comparaison des distributions axiales d'activité expérimentales et calculées

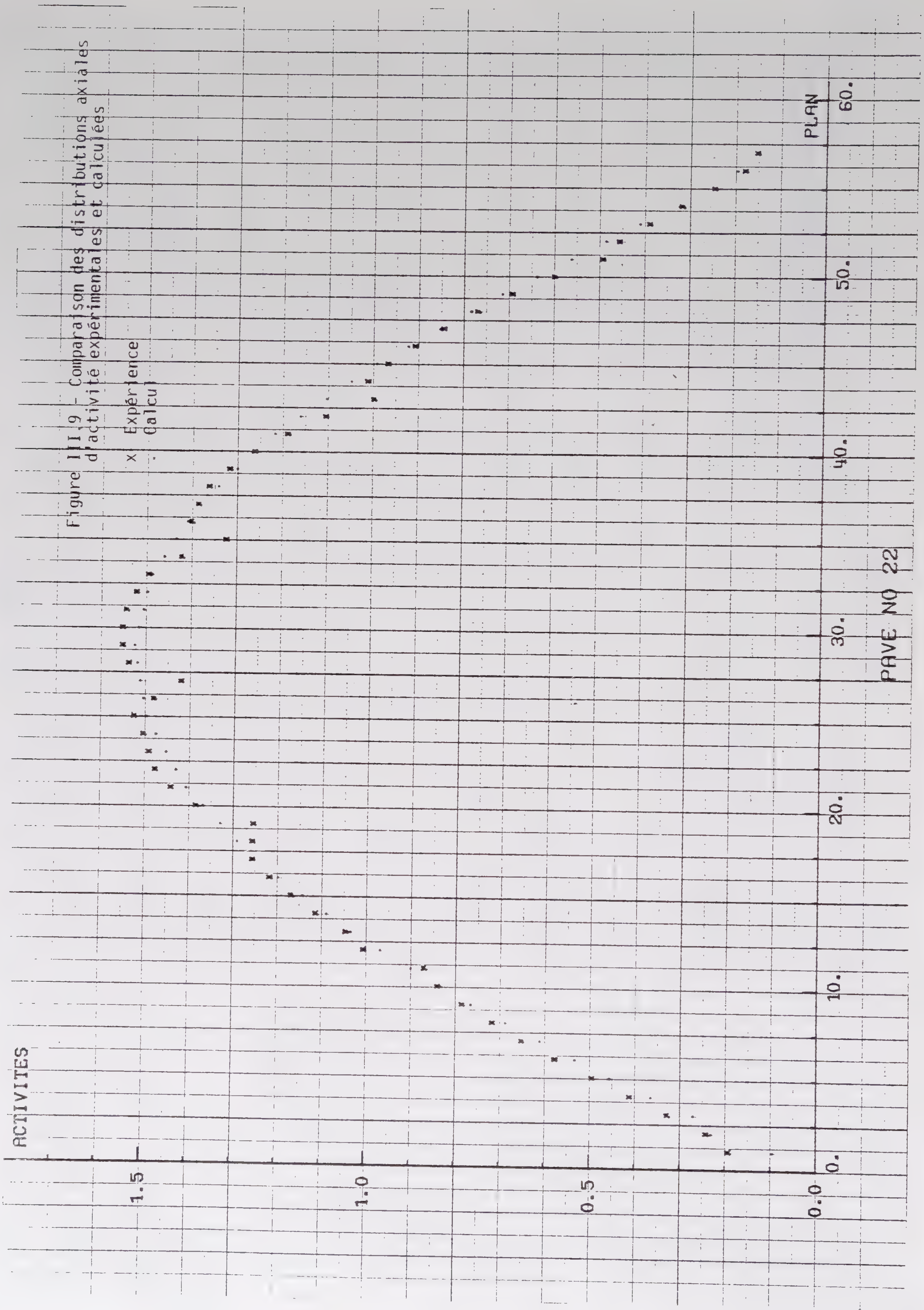


Figure III.9 - Comparaison des distributions axiales d'activité expérimentales et calculées

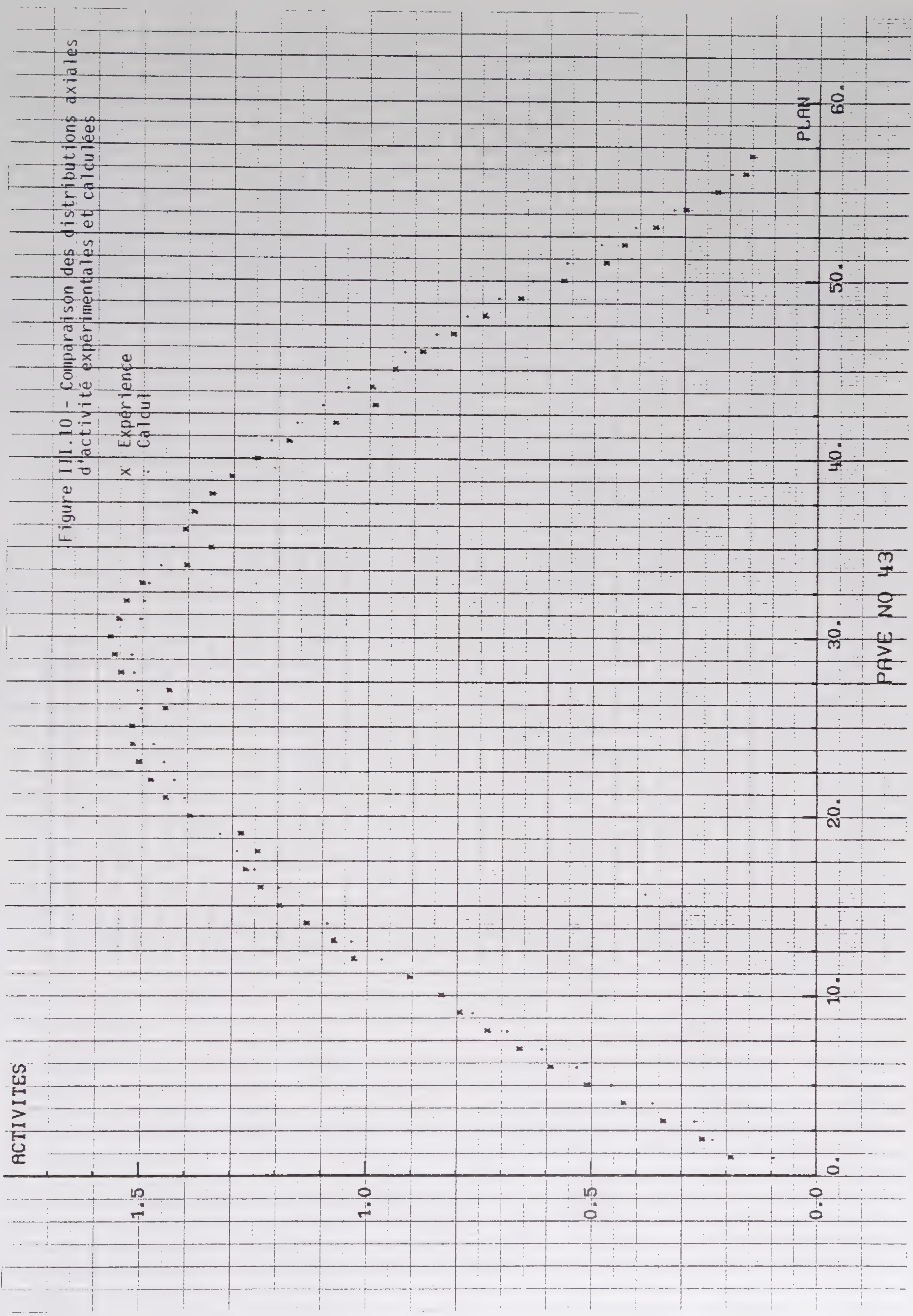


Figure III.10 - Comparaison des distributions axiales d'activité expérimentales et calculées

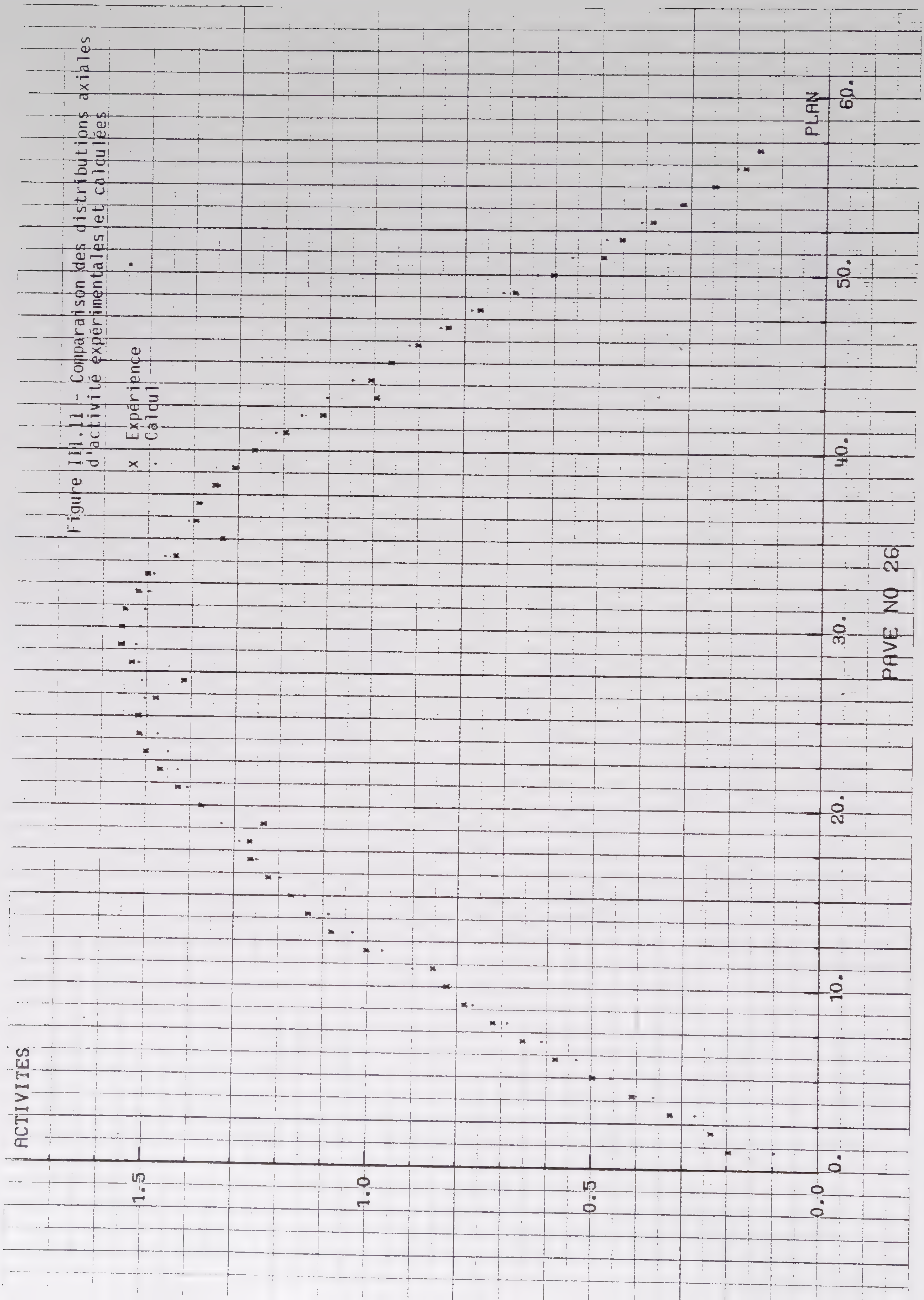


Figure III.11 - Comparaison des distributions axiales d'activité expérimentales et calculées

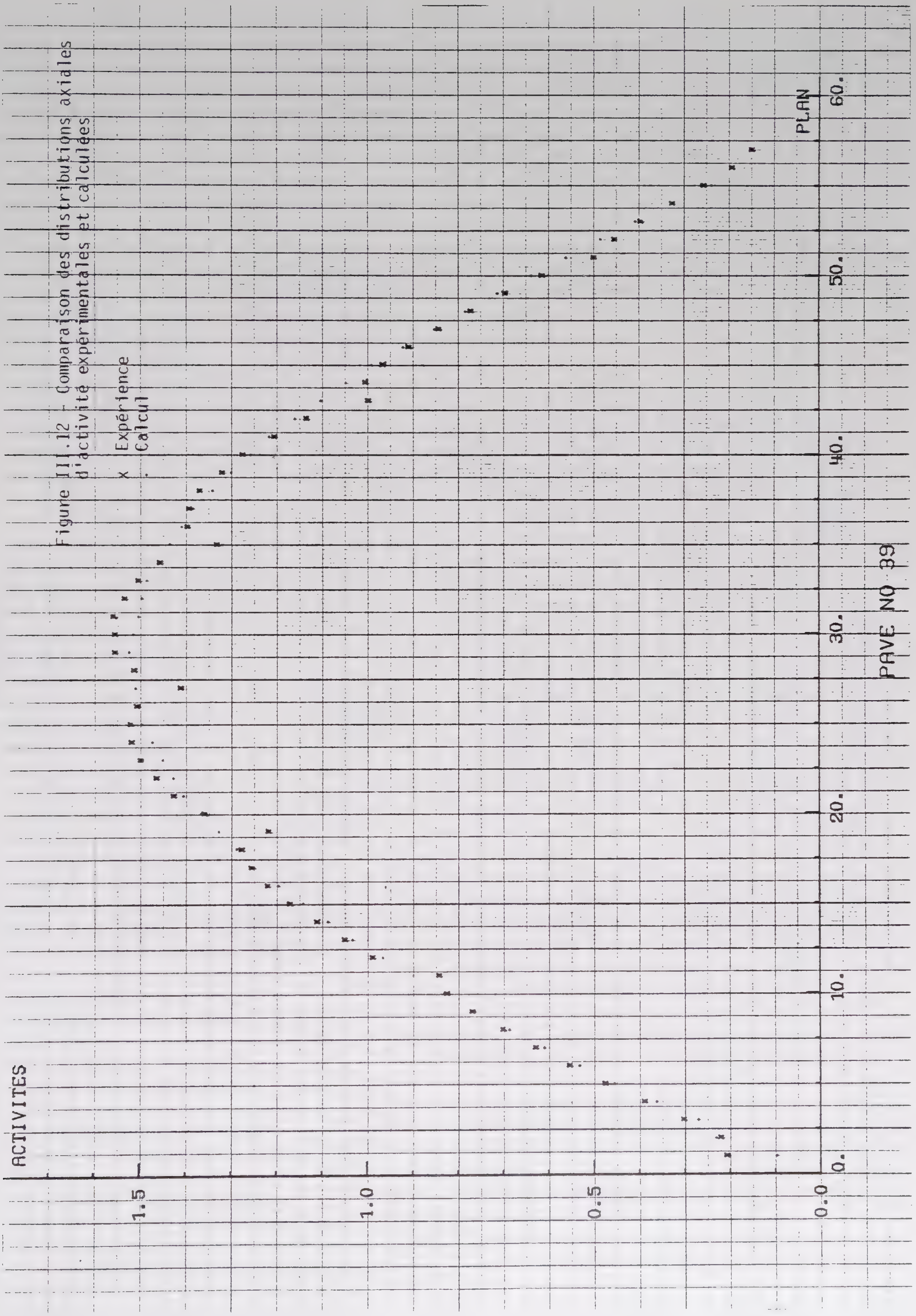


Figure III.12 - Comparaison des distributions axiales d'activité expérimentales et calculées

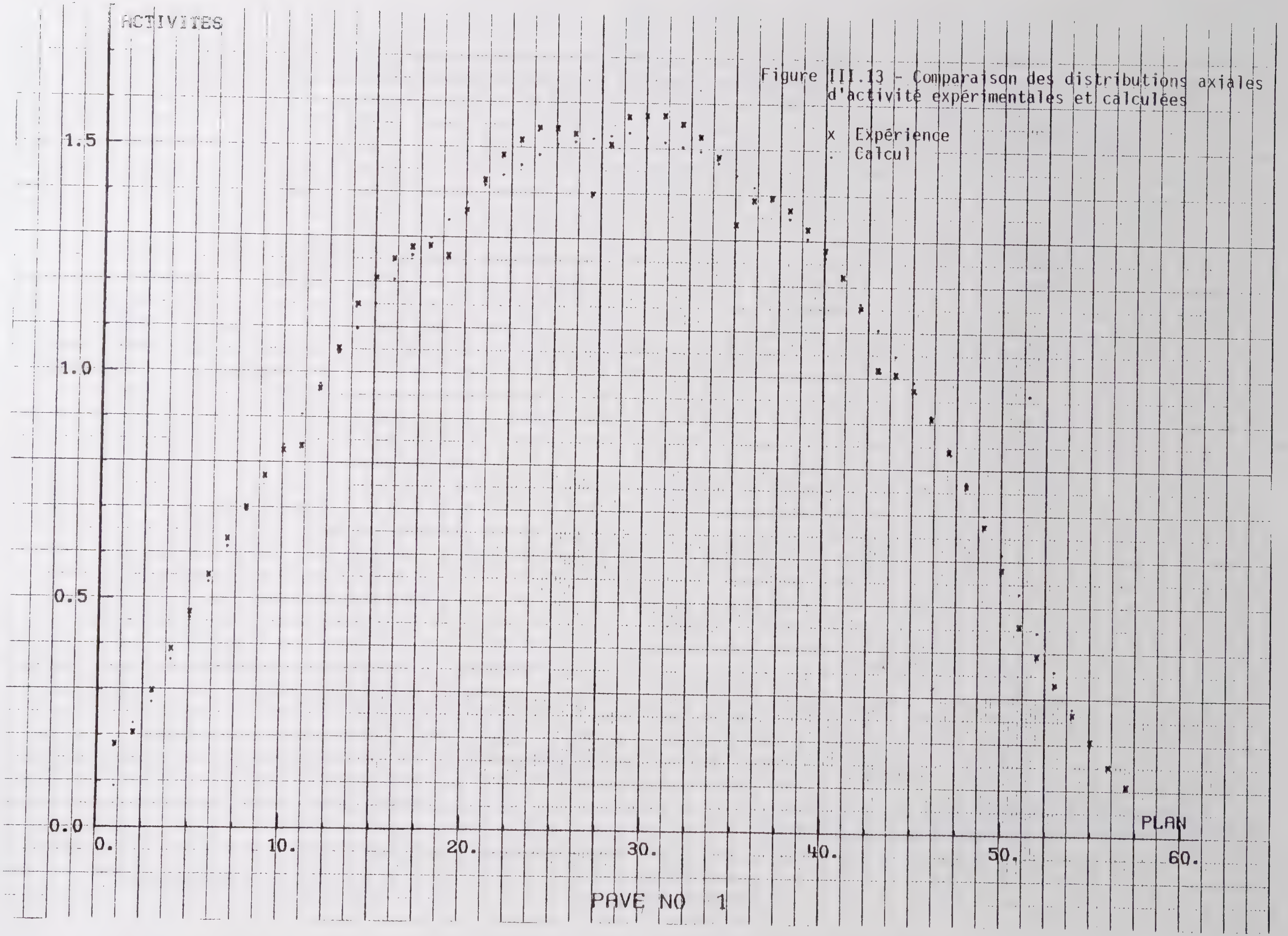


Figure III.13 - Comparaison des distributions axiales d'activité expérimentales et calculées

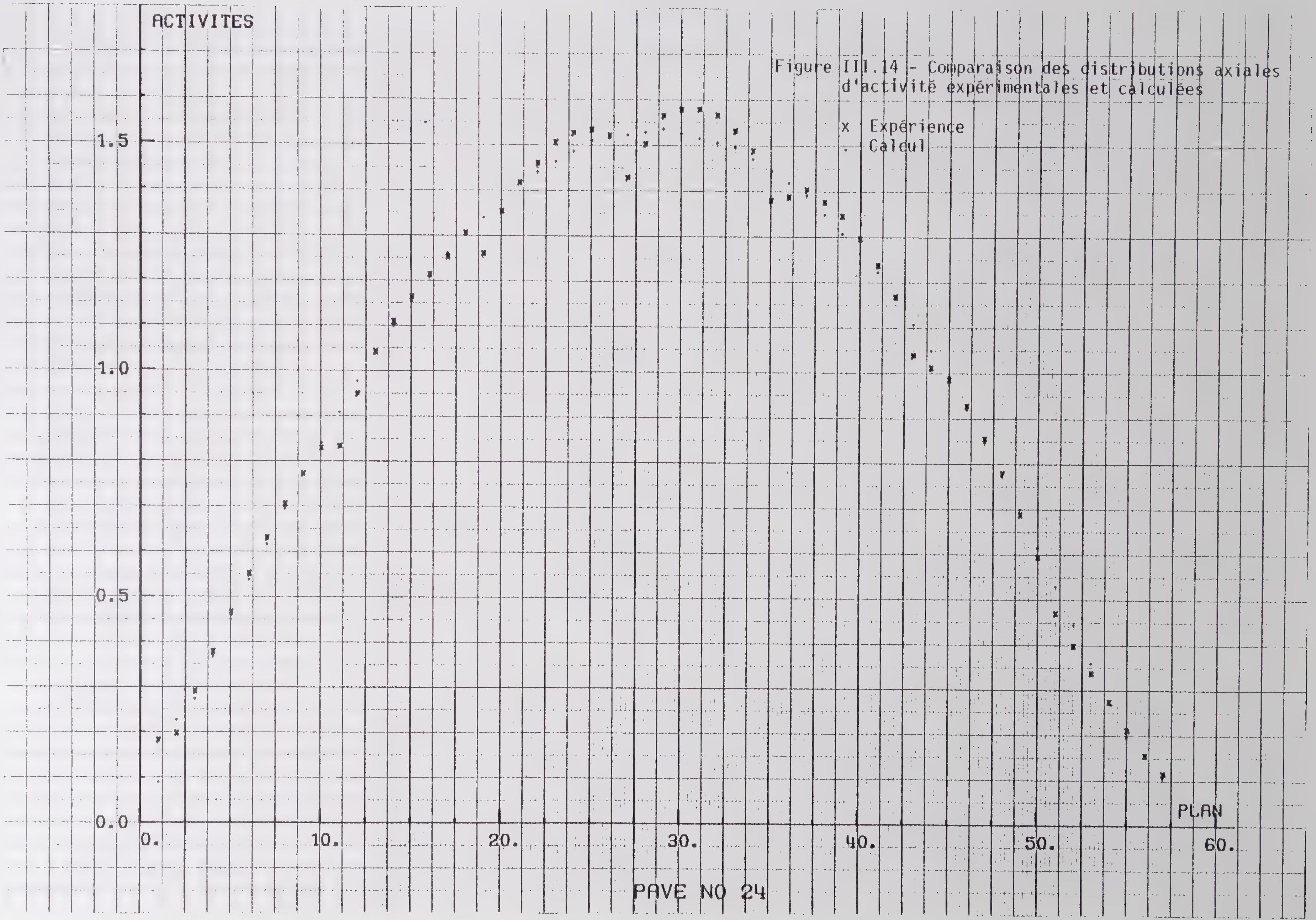


Figure III.14 - Comparaison des distributions axiales d'activité expérimentales et calculées

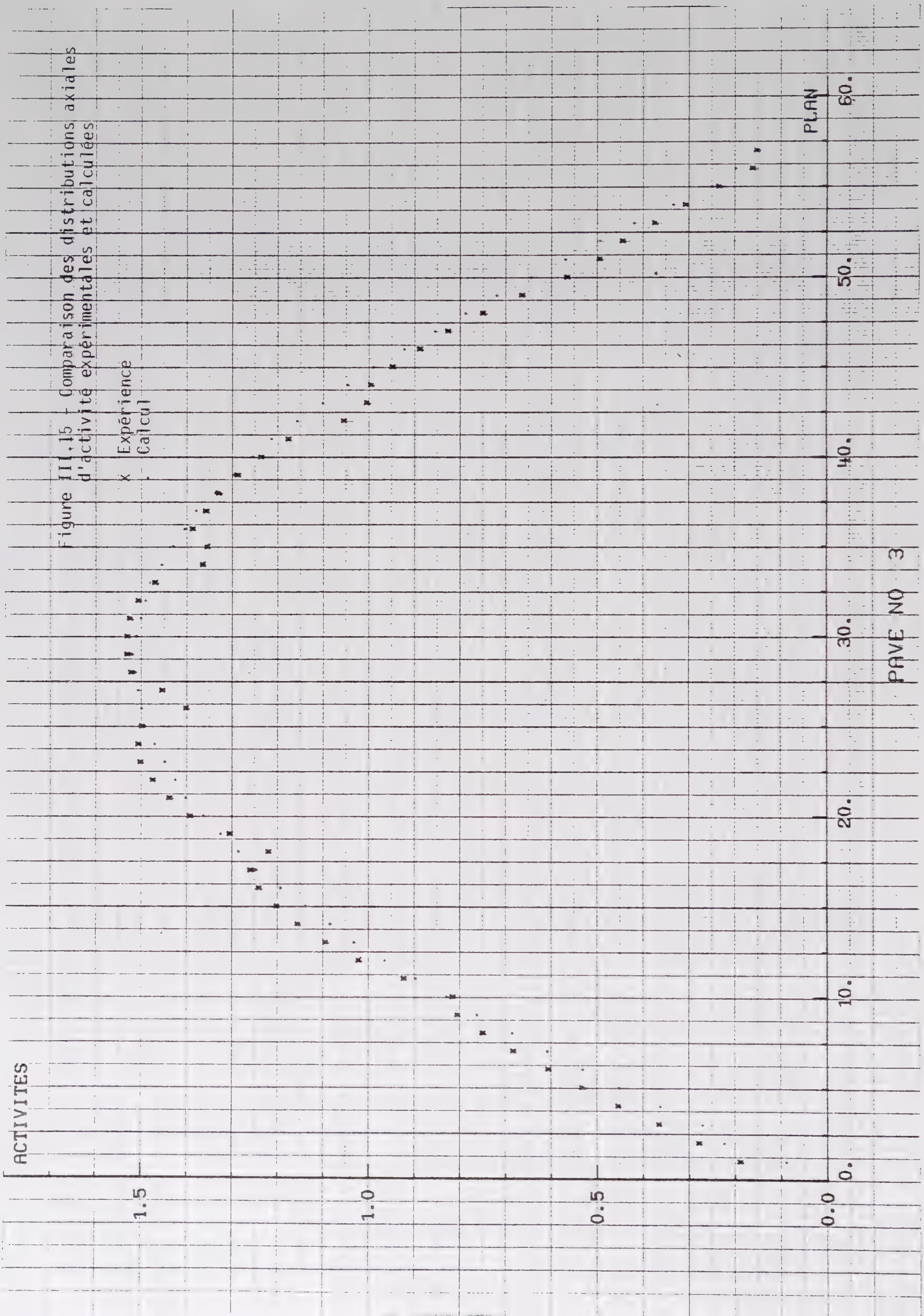


Figure III.15 - Comparaison des distributions axiales d'activité expérimentales et calculées

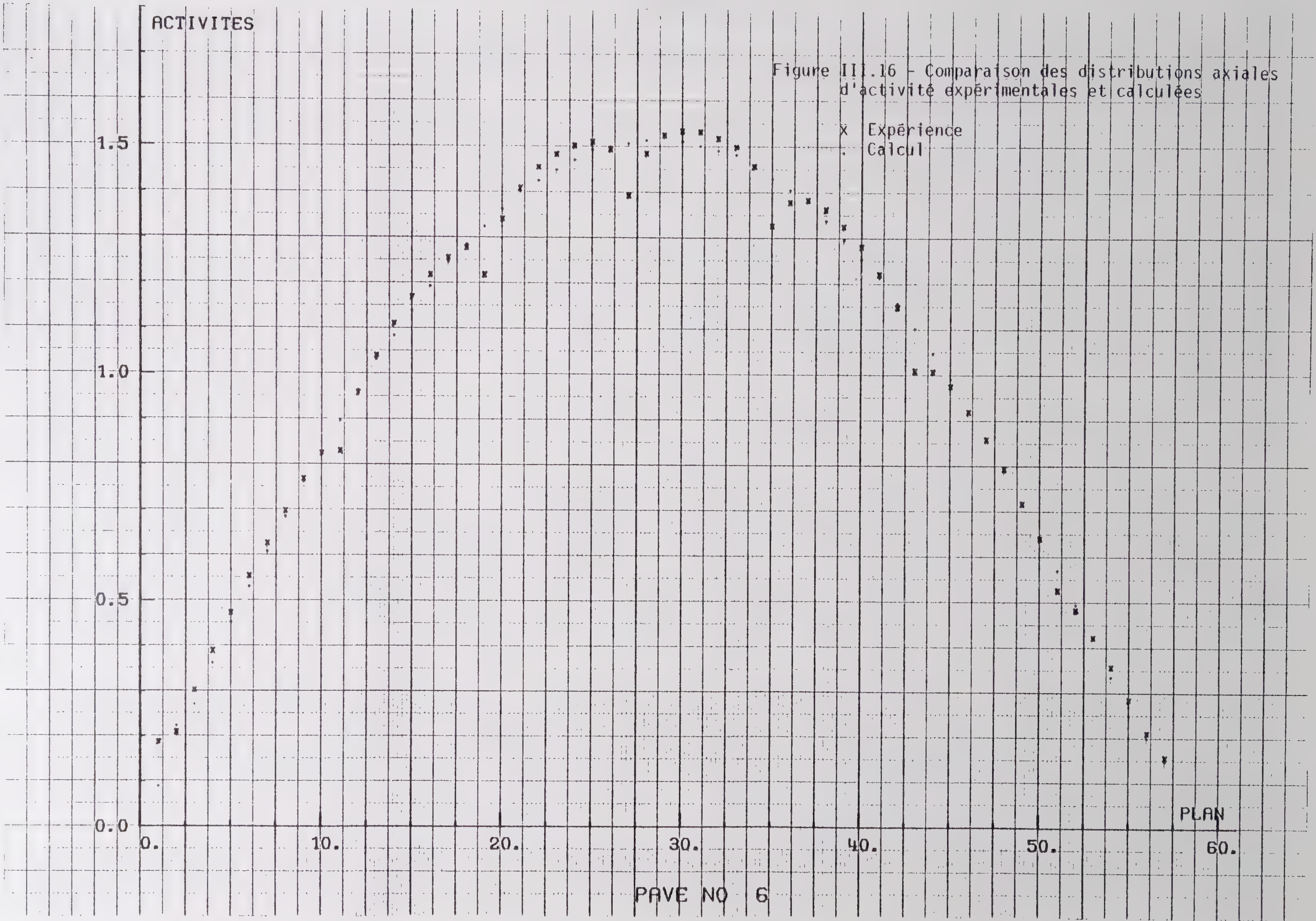


Figure III.16 - Comparaison des distributions axiales d'activité expérimentales et calculées

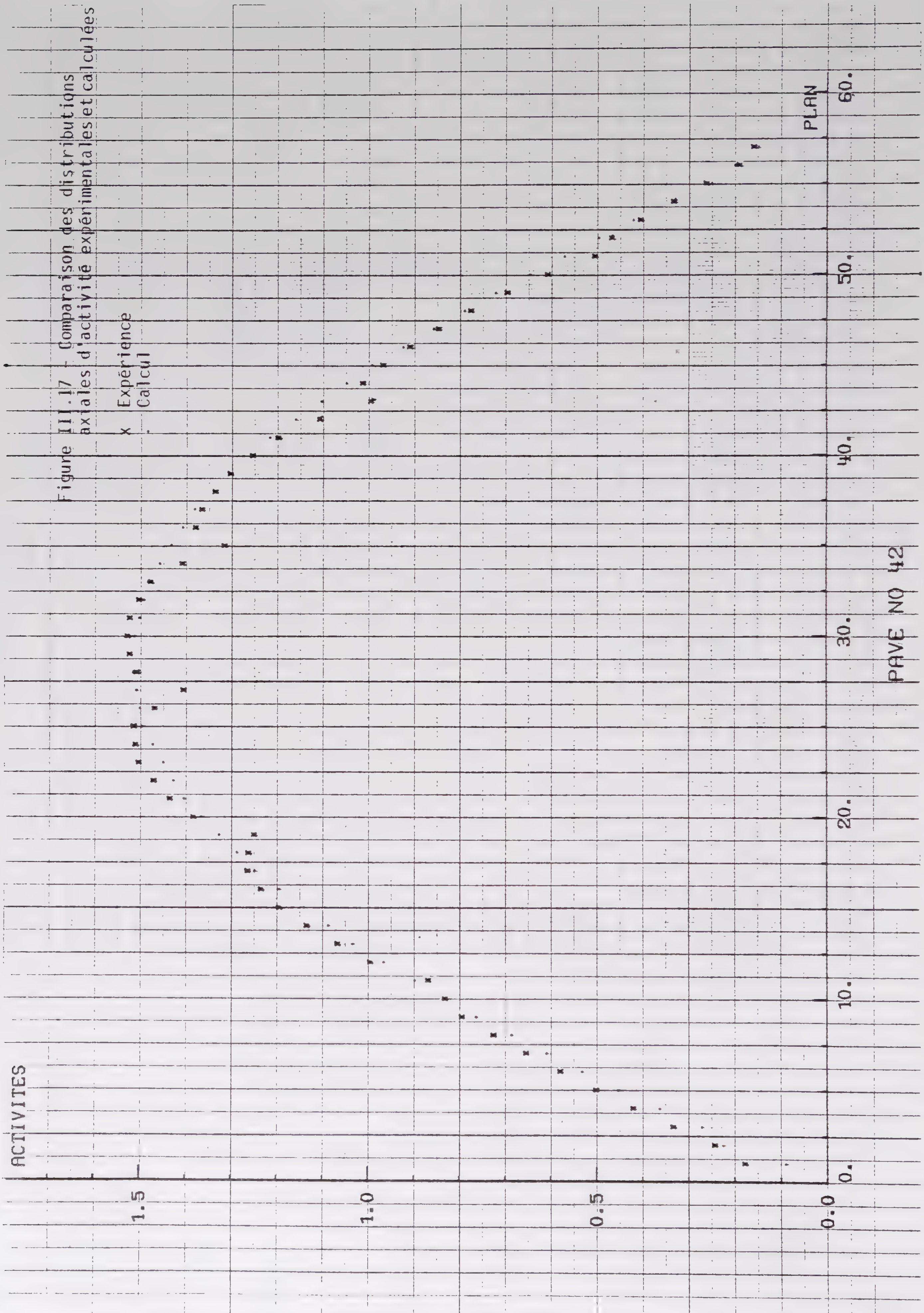


Figure III.17 - Comparaison des distributions axiales d'activité expérimentales et calculées

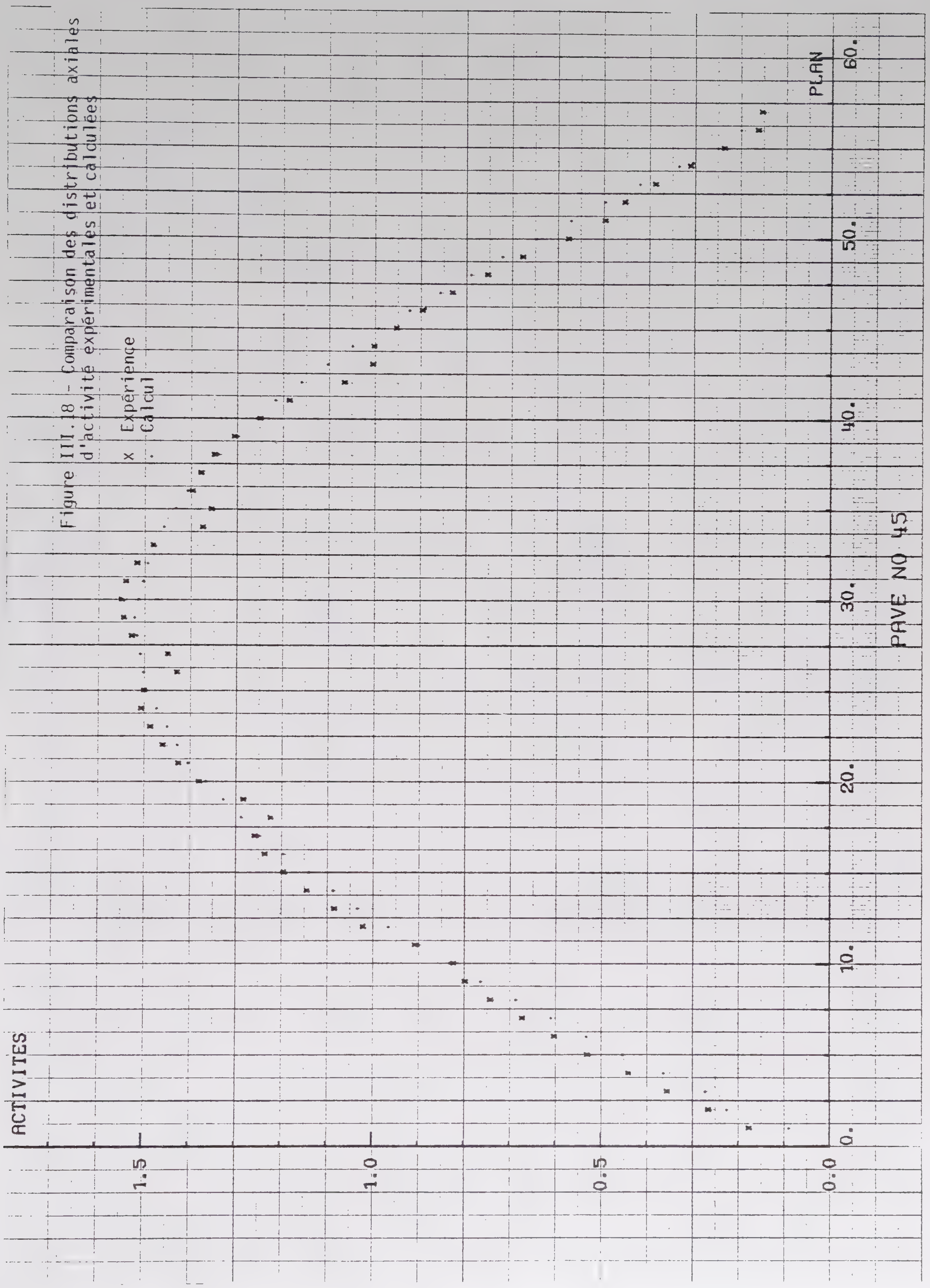


Figure III.18 - Comparaison des distributions axiales d'activité expérimentales et calculées

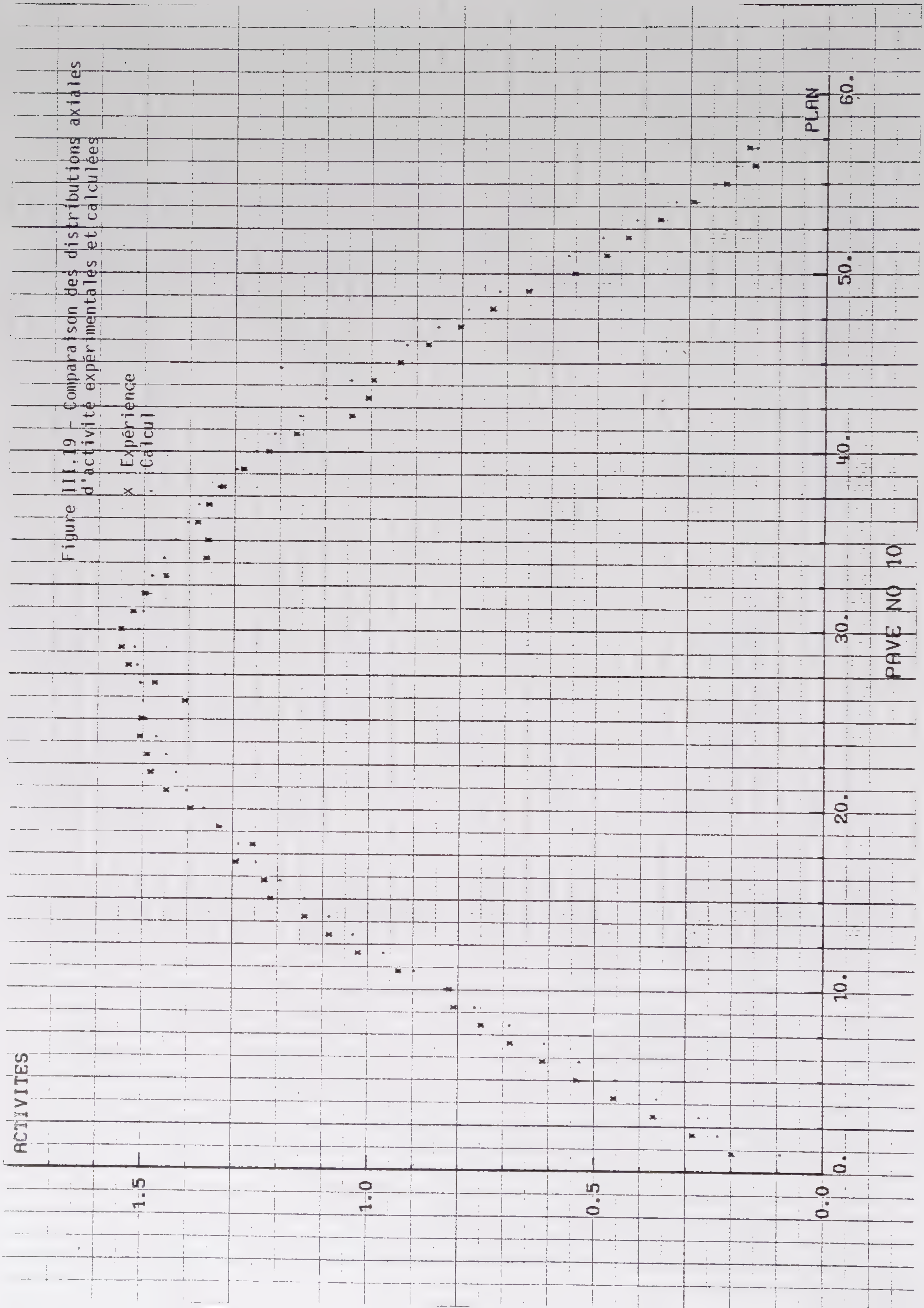


Figure III.19 - Comparaison des distributions axiales d'activité expérimentales et calculées

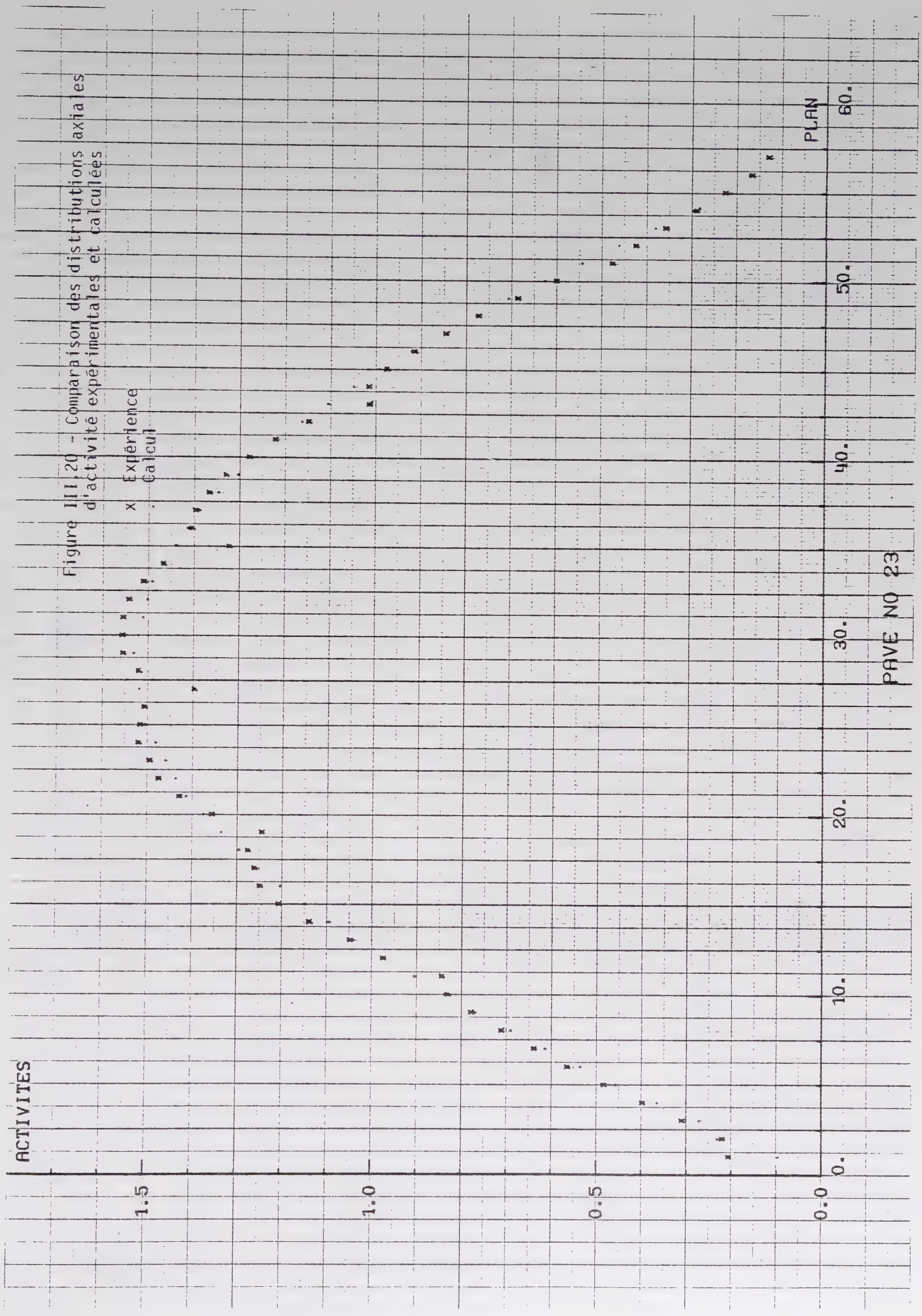


Figure III.20 - Comparaison des distributions axiales d'activité expérimentales et calculées

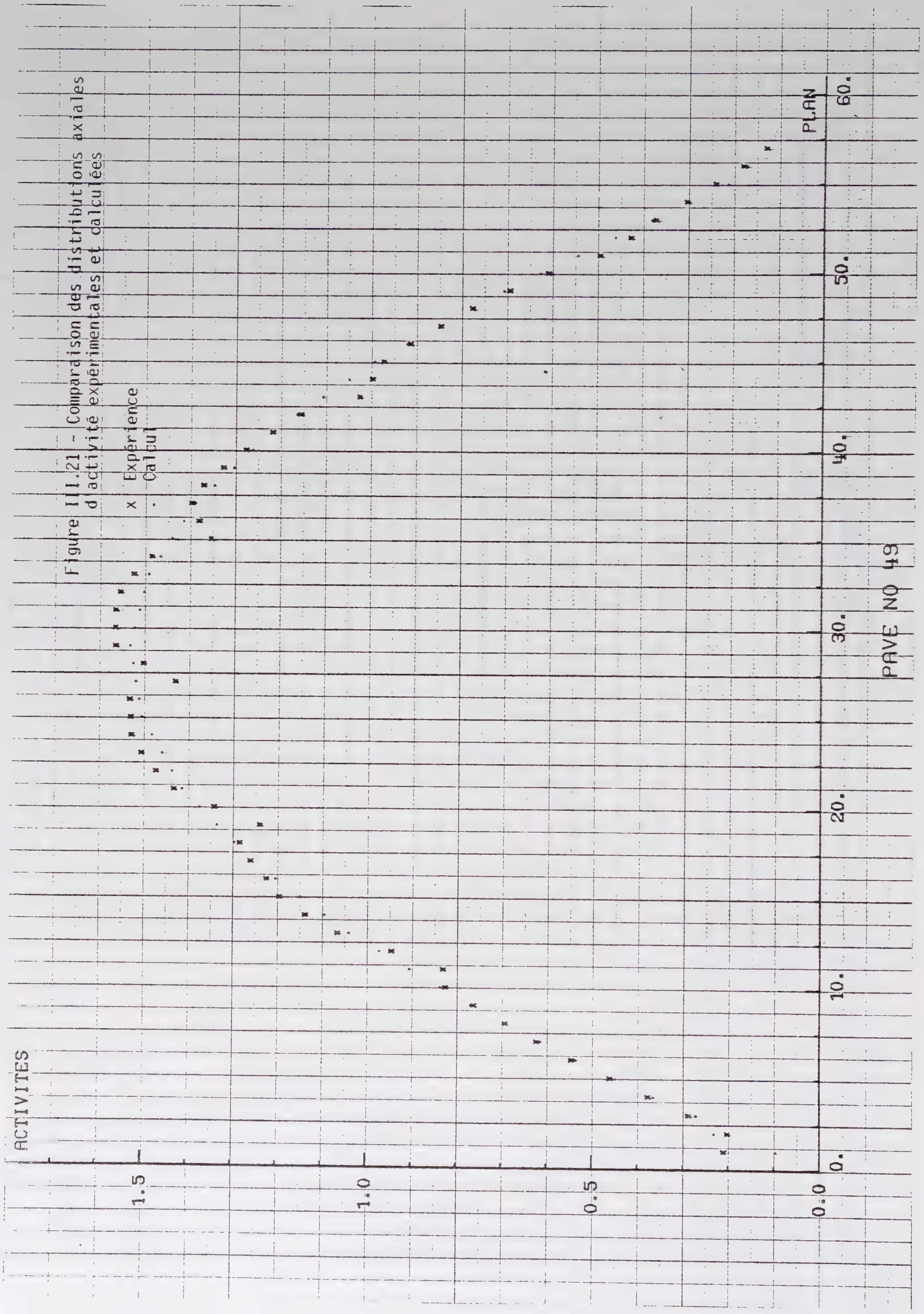


Figure III.21 - Comparaison des distributions axiales d'activité expérimentales et calculées

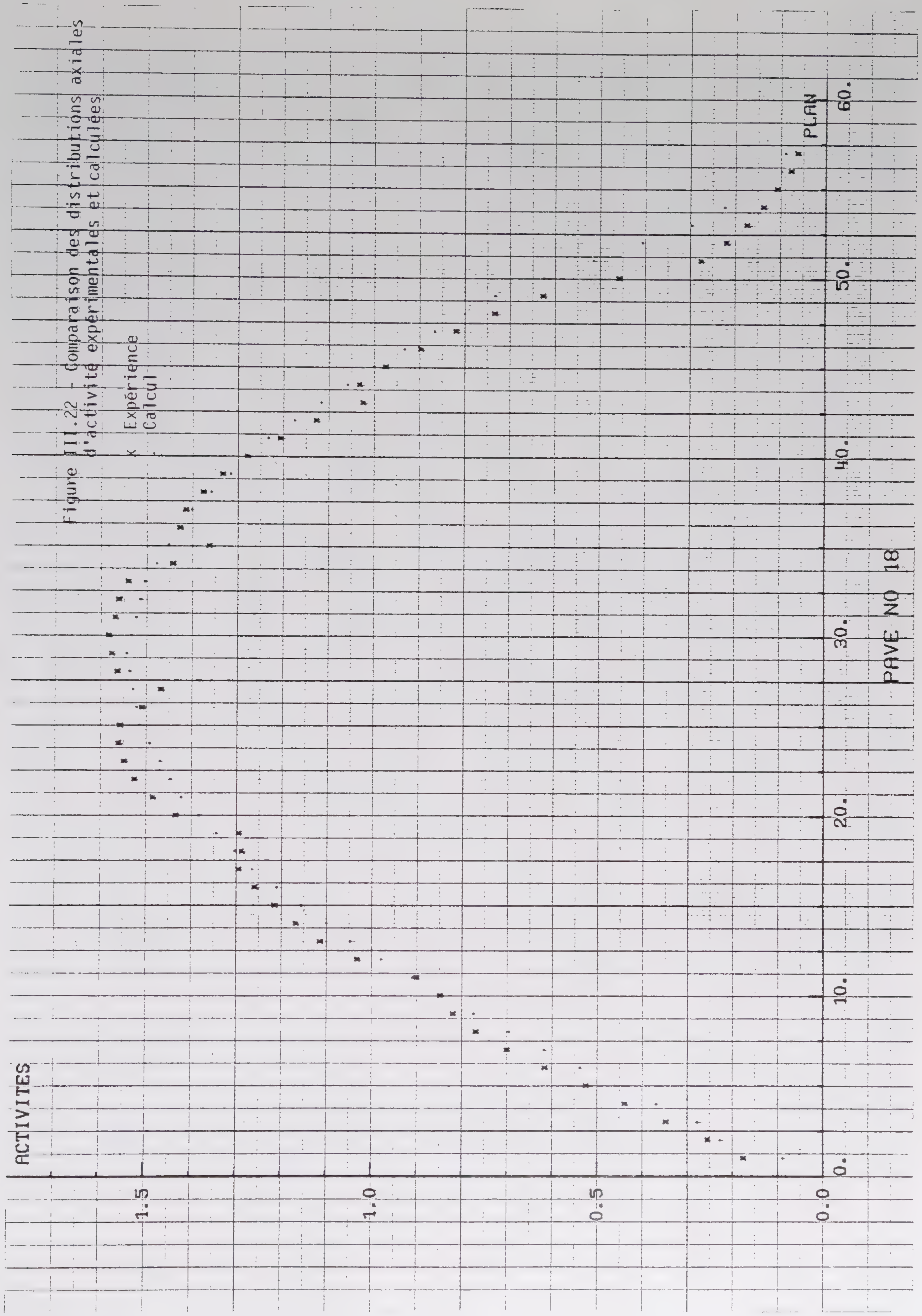


Figure III.22 - Comparaison des distributions axiales d'activité expérimentales et calculées

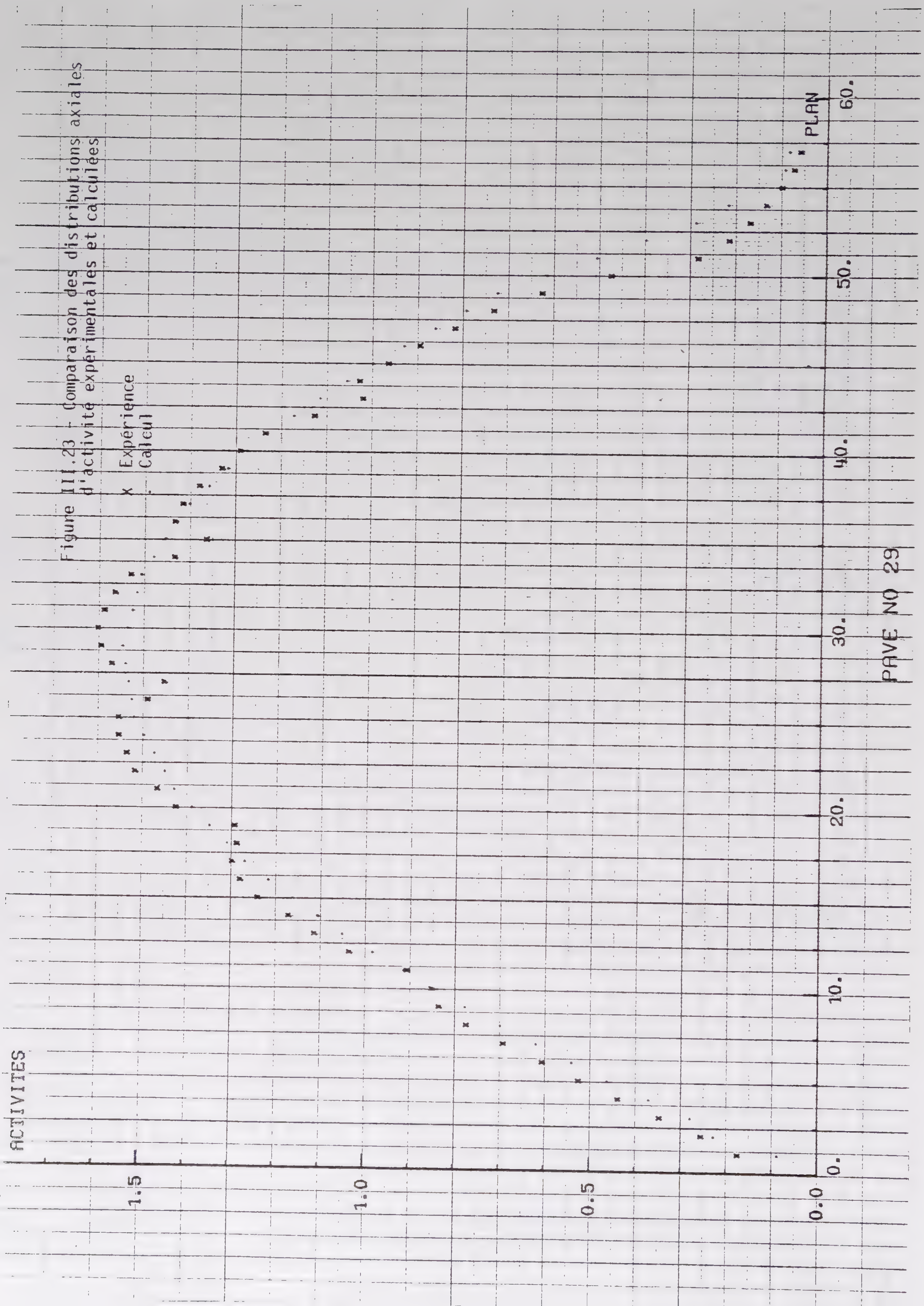


Figure III.23 - Comparaison des distributions axiales d'activité expérimentales et calculées

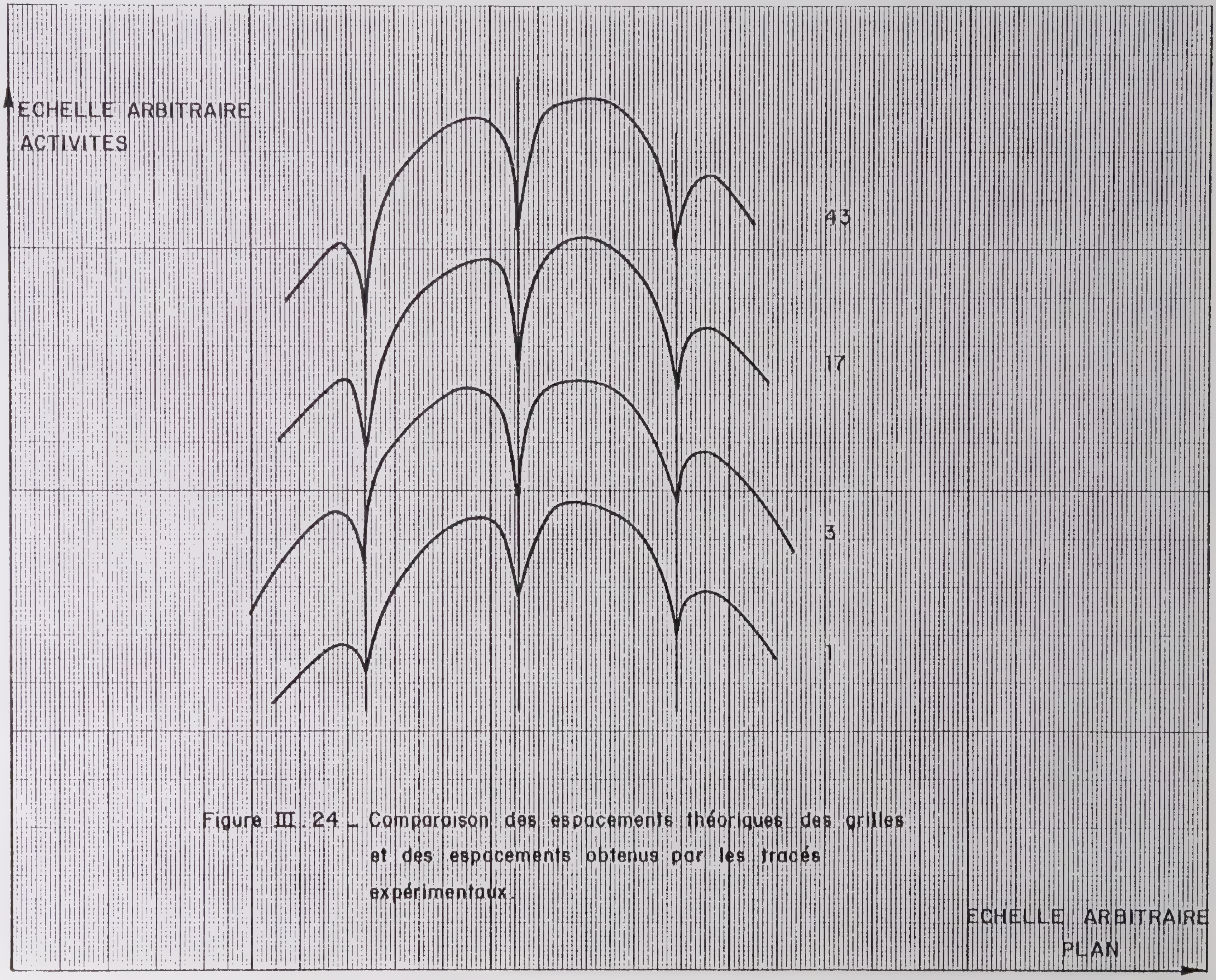


Figure III.24 _ Comparaison des espacements théoriques des grilles et des espacements obtenus par les tracés expérimentaux.

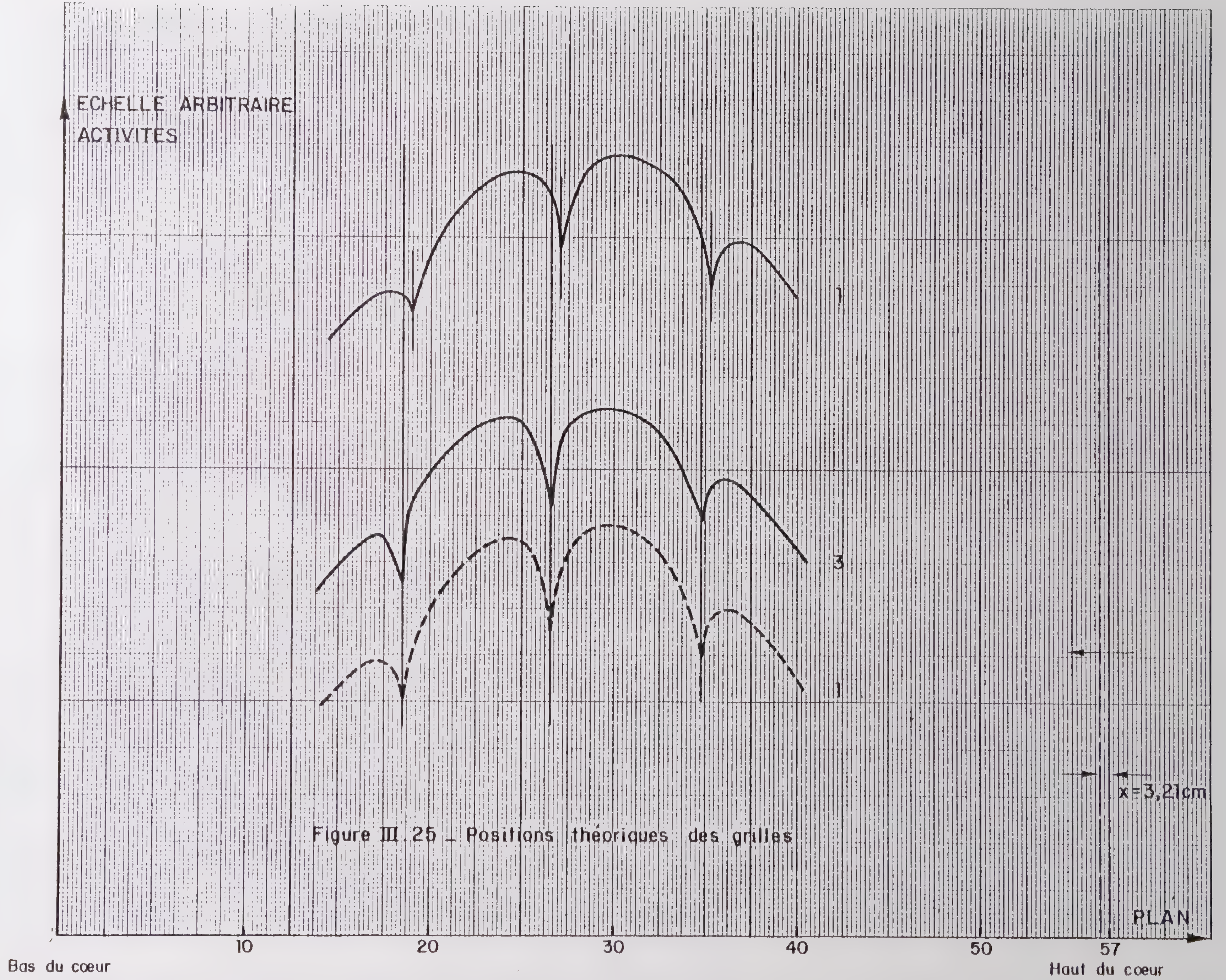


Figure III.25 _ Positions théoriques des grilles

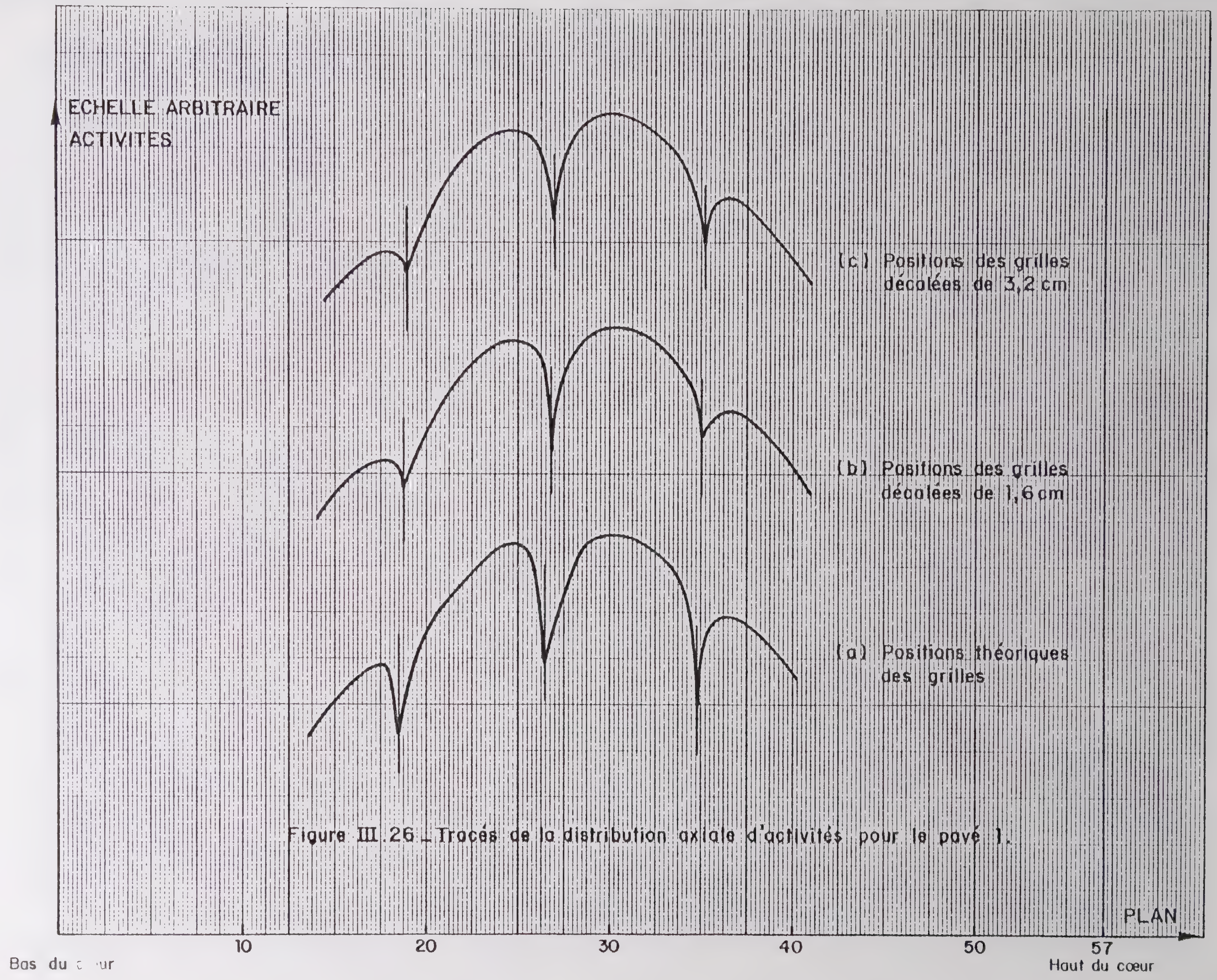


Figure III.26 _ Tracés de la distribution axiale d'activités pour le pavé 1.

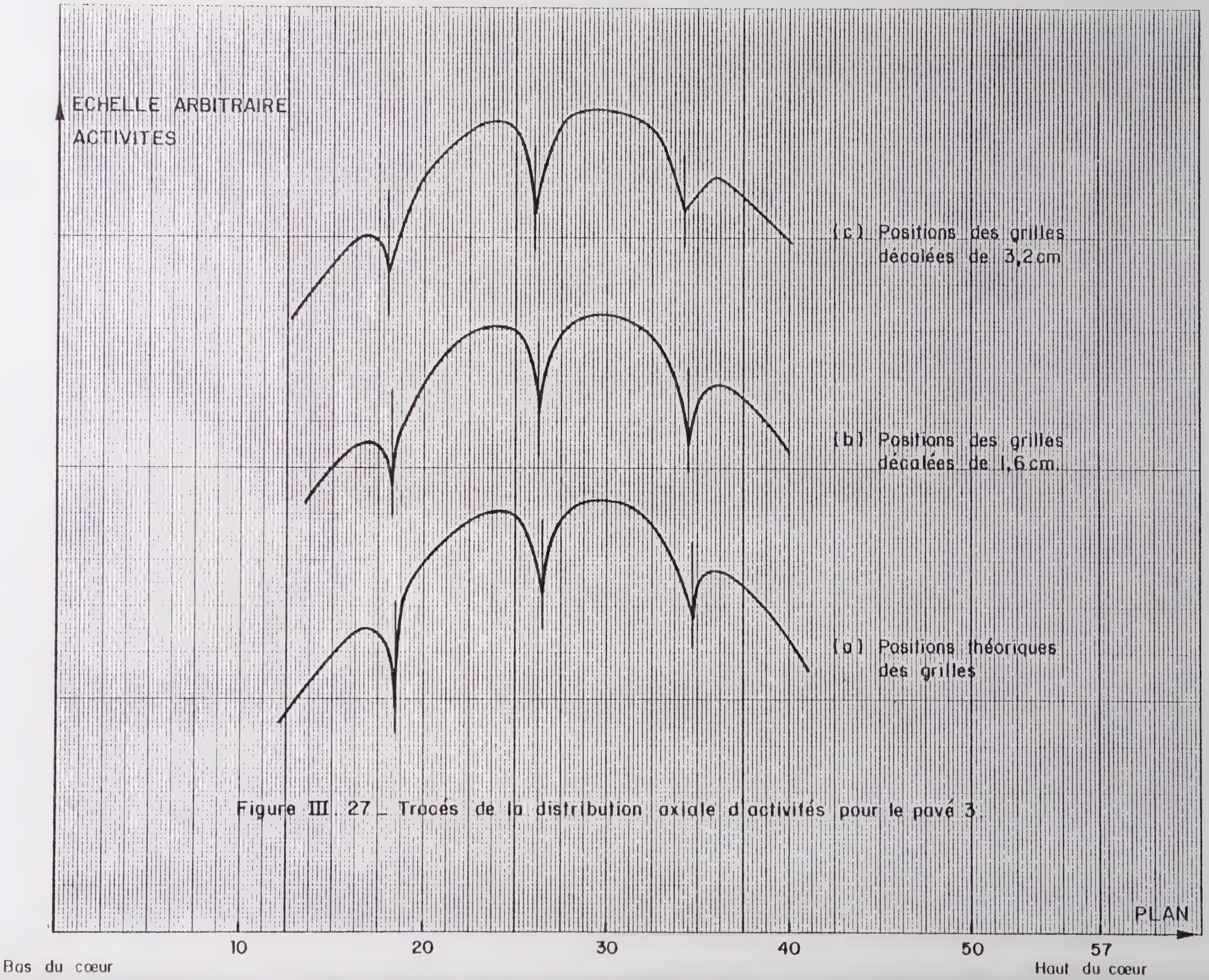


Figure III. 27 _ Tracés de la distribution axiale d'activités pour le pavé 3.

Calcul	Valeur propre
CRONOS 3D	1.00084
CRONOS	1.00008 (-76 pcm)*

Tableau III.56 _ Effet 2D / 3D sur la valeur propre.

Ecart = $(P_{2D}/P_{3D})-1\%$

					-1.06	-3.07		
				0.56	-0.17	-1.13	-3.17	
			2.04	1.06	0.27	-0.39	-1.92	
		1.57	1.51	1.15	0.52	0.17	-0.56	-2.72
Assemblage central →	1.45	1.46	1.36	1.01	0.68	0.40	0.37	-1.60

Tableau III.57 _ Effet 2D / 3D sur la distribution de puissance en début de vie.

---

* Ecart par rapport au calcul CRONOS 3D.

Calcul à 2D : C *
Calcul à 3D : E *
(C-E)/E (%): *

PLAN 1
2D/3D

0. MWJ/T
5. % PN
1325. PPM

							0.7106 0.7248 -1.96							
									0.7833 0.7967 -1.68					
			0.5225 0.5351 -2.36			1.3317 1.3327 -0.08	1.1086 1.1081 0.04				0.5225 0.5351 -2.36			
				0.8902 0.8917 -0.17			1.3655 1.3581 0.54		1.2712 1.2683 0.23					
		0.7535 0.7620 -1.11		1.2491 1.2442 0.39		1.3282 1.3161 0.92				1.2491 1.2442 0.39	0.8902 0.8917 -0.17		0.5073 0.5205 -2.53	
				1.0145 1.0072 0.72			1.2923 1.2773 1.18		1.3329 1.3202 0.96					
		1.3317 1.3327 -0.08				1.2764 1.2597 1.32		1.2764 1.2597 1.32			1.0368 1.0314 0.53		0.8454 0.8539 -1.00	
0.7106 0.7248 -1.96		1.1086 1.1081 0.04		0.9863 0.9772 0.93					1.2923 1.2773 1.18			1.1086 1.1081 0.04	1.2639 1.2738 -0.78	
				1.3282 1.3161 0.92				1.2764 1.2597 1.32	1.0184 1.0063 1.20					0.5394 0.5532 -2.49
		0.9314 0.9358 -0.47				1.0184 1.0063 1.20					1.2712 1.2683 0.23		0.7833 0.7967 -1.68	
				1.2491 1.2442 0.39			0.9863 0.9772 0.93		1.0145 1.0072 0.72	1.2491 1.2442 0.39				
		0.5225 0.5351 -2.36				1.0368 1.0314 0.53					0.9608 0.9711 -1.06	0.5225 0.5351 -2.36		
							1.1086 1.1081 0.04		0.9314 0.9358 -0.47					
				0.5073 0.5205 -2.53				0.8454 0.8539 -1.00						
						0.5394 0.5532 -2.49								

TABLEAU III.58 - EFFET 2D/3D SUR LES VALEURS D'ACTIVITÉS EN DÉBUT DE VIE.

III.5 - CALCUL DES TAUX DE COMBUSTION EN FIN DE PREMIER CYCLE. DETERMINATION D'UN SCHEMA DE CALCUL VALABLE POUR L'ENSEMBLE DES CYCLES

L'analyse précédente, menée à deux dimensions, pour le cycle 1, conduit aux conclusions suivantes :

- Pour le premier coeur où la distribution axiale des taux de combustion varie peu dans le coeur, un calcul de gestion à deux dimensions avec un laplacien axial variable en évolution serait suffisant[*].

- Les options de calcul recommandées sont : maillage de (2x2) mailles par assemblage, avec les polynômes d'interpolation de flux "Cubique Lagrange (CL16)".

Néanmoins un schéma de calcul de gestion pour l'ensemble des cycles, tridimensionnel avec couplage thermohydraulique dans les conditions précédentes s'avère coûteux.

L'objectif de cette partie de notre étude est de définir des options de calcul satisfaisantes et plus économiques à partir d'une analyse à deux dimensions en évolution et à trois dimensions en début de cycle pour le coeur neuf.

III.5.1 - Influence du maillage sur les résultats de calcul de coeur à trois dimensions en début de cycle

Nous avons comparé les résultats de calcul de coeur à trois dimensions en début de cycle (taux de combustion nul et à 5 % PN) représentés au paragraphe (III.4), (CRONOS 3D), et les résultats d'un calcul similaire (CRONOS 3D1M) mais avec un maillage plus grossier (1x1) maille en x et y dans l'assemblage, afin de déterminer l'effet de maillage sur les résultats de calcul.

---

[*] Toutefois, dans le but d'adopter un schéma cohérent pour tous les cycles, l'évolution du premier coeur sera calculée à trois dimensions.

Les valeurs propres, sont indiquées pour les deux calculs dans le tableau (III.59). Nous constatons un écart faible entre ces valeurs de - 25 pcm.

Les écarts sur la distribution radiale de puissance condensée axialement sont faibles, de même que les écarts sur la distribution axiale de puissance condensée radialement, (inférieur à 1 % dans chacun des cas) tableaux (III.60) et (III.61).

Les valeurs d'activités calculées et condensées axialement, ainsi que les écarts calcul-expérience sont données dans les tableaux (III.55) et (III.62) respectivement pour les calculs (CRONOS 3D) et (CRONOS 3D1M).

Contrairement à la distribution de puissance, on remarque des valeurs d'activités calculées différentes dans les deux cas. Nous atteignons, dans le calcul (CRONOS 3D1M), des écarts moyens dans les assemblages enrichis à 2.1 % et 2.6 % du centre de :

3.37 % et - 1.96 %

au lieu de :

0.65 % et 1.43 %

dans le calcul (CRONOS 3D) ; ce qui change l'effet de damier de :

5.33 % à 0.78 %

L'écart moyen dans les assemblages périphériques passe de

- 4.89 % à - 4.07 %.

III.5.2 - <u>Influence du maillage sur les résultats des calculs du coeur au cours du premier cycle à deux dimensions</u>

Dans le but de déterminer l'influence d'un maillage grossier (1x1) dans l'assemblage sur l'évolution de la valeur propre, des distributions de puissance moyenne par assemblage et du taux de combustion en cours de

premier cycle, nous nous proposons de comparer les résultats de calcul du coeur (CRONOS) [III.2.1] et d'un autre calcul du coeur sous les mêmes conditions mais avec un maillage (1x1), (CRONOS 1M).

III.5.2.1 - Valeur propre

Les valeurs propres de deux calculs, ainsi que les écarts sont donnés dans le tableau (III.63).

On observe des écarts faibles, inférieurs à 100 pcm.

III.5.2.2 - Distribution de puissance

Nous avons aussi comparé les distributions de puissance des deux calculs, précédemment cités, pour les trois taux d'irradiation : 0, 1173 et 14979 MWj/T, [tableaux (III.64) à (III.66)].

On remarque :

- En début de cycle, des écarts de l'ordre de 1 % au centre et - 1.5 % en périphérie.

- A 1 173 MWj/T, les écarts sont inférieurs à 1 %.

- En fin de cycle, les écarts sont de l'ordre de - 0.6 % au centre et 1 % en périphérie.

III.5.2.3 - Taux de combustion

En comparant les taux de combustion à 1 173 MWj/T et en fin de cycle, tableaux (III.67) et (III.68), on trouve que les écarts ont varié de - 0.4 % à 1.3 % au centre et de - 0.4 % à 0.6 % en périphérie à 1 173 MWj/T.

En fin de cycle, les écarts au centre sont passés de - 0.5 % à 1.3 %, les écarts en périphérie changent de 0.8 % à 1.9 %.

III.5.3 - Conclusion

De cette analyse nous pouvons conclure qu'avec le calcul de coeur au maillage grossier (1x1), la distribution radiale des activités est imparfaitement calculée. Par contre, l'évolution de la valeur propre, les distributions de puissance moyenne par assemblage et par conséquent les taux de combustion en fin de cycle sont correctement calculés.

Ces éléments d'appréciation nous conduisent à effectuer le calcul d'évolution du premier cycle dans les conditions suivantes : calcul tridimensionnel avec un maillage (1x1) par assemblage et polynômes d'interpolation "Cubique Lagrange (CL16)", calcul réalisé en [29]. C'est à partir des taux de combustion ainsi déterminés que l'étude du début du second cycle sera effectuée.

Calcul	Valeur propre
CRONOS 3D	1.00084
CRONOS 3D 1M	1.00059 (- 25 pcm)*

Tableau III.59 _ Comparaison des valeurs propres entre les calculs (CRONOS 3D 1M) et (CRONOS 3D).

Ecart = $(P_{1M}/P) - 1\%$

					-0.81	-0.46		
				-0.56	0.62	0.03	-0.84	
			-0.62	0.98	-0.73	0.39	-0.72	
		-0.37	0.89	-0.53	0.86	-0.52	0.56	-0.99
Assemblage central →	-0.29	0.78	-0.45	0.83	-0.43	0.65	-0.46	-0.08

Tableau III.60 _ Comparaison des distributions radiales de puissance entre les calculs (CRONOS 3D 1M) et (CRONOS 3D).

* Ecart par rapport au calcul (CRONOS 3D)

Cote Z en cm	Ecart* %
33.147	-0.73
46.293	-0.70
72.587	-0.60
98.880	-0.46
125.173	-0.36
151.466	-0.08
177.760	0.00
204.053	0.13
230.350	0.27
256.64	0.28
282.93	0.23
309.23	0.18
335.52	0.10
361.81	0.02
374.96	-0.07
388.11	-0.11

Tableau III 61 _ Comparaison des distributions axiales de puissance entre les calculs (CRONOS 3D 1M) et (CRONOS 3D).

* Ecart en pcm par rapport au calcul (CRONOS 3D).

CALCUL : C *
EXP : E *
(C-E)/E (%): *

ZONE 2
3D CR

0. MWJ/T
5. % FN
1325. PPM

							0.7124 0.7539 -5.50							
									0.8007 0.8485 -5.63					
			0.5329 0.5707 -6.62			1.3731 1.2642 8.62	1.0852 1.0734 1.10				0.5329 0.5755 -7.41			
				0.8610 0.8818 -2.35			1.3758 1.3437 2.39		1.3075 1.2974 0.78					
		0.7505 0.7548 -0.56		1.2822 1.2220 4.92		1.3584 1.3216 2.78				1.2822 1.2635 1.48	0.8610 0.9084 -5.22		0.5215 0.5479 -4.82	
				0.9605 0.9895 -2.93			1.2964 1.3099 -1.03		1.3576 1.2418 9.33					
		1.3731 1.3069 5.07				1.3005 1.2339 5.40		1.3005 1.2715 2.28			0.9854 1.0110 -2.54		0.8144 0.8630 -5.63	
0.7124 0.7097 0.39		1.0852 1.0672 1.69		0.9514 0.9672 -1.63					1.2964 1.2653 2.42			1.0852 1.0540 2.96	1.2791 1.2437 2.84	
				1.3584 1.3055 4.05				1.3005 1.2832 1.35	0.9608 0.9730 -1.25					0.5565 0.5727 -2.83
		0.9100 0.9363 -2.80				0.9608 0.9937 -3.30					1.3075 1.2000 8.96		0.8007 0.8182 -2.13	
				1.2822 1.2628 1.54			0.9514 0.9396 1.25		0.9605 1.0029 -4.23	1.2822 1.2607 1.70				
		0.5329 0.5604 -4.91				0.9854 1.0465 -6.02					0.9947 1.0025 -0.78	0.5329 0.5603 -4.89		
							1.0852 1.0840 0.11		0.9100 0.9707 -6.25					
				0.5215 0.5578 -6.52				0.8144 0.8943 -8.94						
						0.5565 0.6109 -8.90								

TABLEAU III.62 - COMPARAISON DES ACTIVITÉS EXPÉRIMENTALES ET CALCULÉES PAR CRONOS 3D1M À 0 MWJ/T.

Irradiation (MWJ/T)	CRONOS	CRONOS 1M
0	1.00008	0.99993 (-15)*
280	0.99927	0.99940 (13)
500	0.99747	0.99725 (-22)
1173	0.99871	0.99860 (-11)
2748	0.99604	0.99611 (7)
4000	0.99398	0.99419 (21)
5363	0.99314	0.99349 (35)
6500	0.99271	0.99319 (48)
7755	0.99316	0.99374 (58)
9000	0.99303	0.99374 (71)
10844	0.99258	0.99327 (69)
13340	0.99418	0.99500 (82)
14979	0.99280	0.99366 (87)

Tableau III.63 _ Comparaison des valeurs propres entre les calculs (CRONOS 1M) et (CRONOS).

* Ecart par rapport au calcul (CRONOS).

$Ecart = (P_{1M} / P) - 1\%$

					-1.06	-1.20		
				-0.28	0.60	-0.32	-1.80	
			0.09	1.40	-0.55	0.20	-1.51	
		0.45	1.66	0.00	1.12	-0.78	0.00	-2.19
Assemblage central →	0.67	1.72	0.27	1.45	-0.25	0.56	-0.92	-1.03

Tableau III.64 _ Comparaison des distributions de puissance en début de cycle entre les calculs (CRONOS 1M) et (CRONOS).

$Ecart = (P_{1M} / P) - 1\%$

					-0.07	0.28		
				-0.61	0.82	0.70	-0.14	
			-0.98	0.59	-0.65	0.67	-0.10	
		-0.82	0.31	-0.90	0.47	-0.52	0.83	-0.60
Assemblage central →	-0.61	0.22	-0.88	0.26	-0.72	0.51	-0.20	0.45

Tableau III.65 _ Comparaison des distributions de puissance à 1173 MWJ/T entre les calculs (CRONOS 1M) et (CRONOS).

Ecart = $(P_{1M} / P) - 1$ %

					0.11	0.65		
				-0.72	0.45	0.93	0.71	
			-1.18	-0.11	-0.69	0.67	0.62	
		-1.21	-0.44	-1.16	-0.04	-0.28	1.29	0.92
Assemblage central →	-1.12	-0.61	-1.21	-0.39	-0.88	0.26	0.63	1.84

Tableau III.66 _ Comparaison des distributions de puissance en fin de cycle entre les calculs (CRONOS 1M) et (CRONOS).

Ecart = $(\tau_{1M} / \tau) - 1$ %

					-0.37	-0.41		
				-0.14	1.07	0.43	0.73	
			-0.16	1.38	-0.15	1.01	-0.29	
		-0.04	1.27	0.00	1.41	0.06	1.22	-0.57
Assemblage central →	0.00	0.98	0.15	1.29	0.18	1.41	0.24	0.61

Tableau III.67 _ Comparaison des taux de combustion à 1173 MWJ/T entre les calculs (CRONOS 1M) et (CRONOS).

$\text{Ecart} = (\tau_{1M} / \tau) - 1\%$

				0.53	0.97		
			-0.11	1.20	1.41	0.84	
		-0.48	0.90	-0.12	1.30	0.85	
	-0.52	0.55	-0.38	0.95	0.25	1.74	0.88
-0.47	0.37	-0.52	0.60	-0.15	1.15	0.86	1.87

Assemblage central → (first cell of the bottom row)

Tableau III.68 _ Comparaison des taux de combustion en fin de cycle entre les calculs (CRONOS 1M) et (CRONOS).

CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons traité le premier cycle du réacteur FESSENHEIM en adoptant le schéma de calcul défini au chapitre II et en utilisant des bibliothèques évolutives à variations permettant de prendre en compte les effets des contre-réactions liées à la puissance : effet Doppler, dû au changement de température du combustible et effet dû à la variation de la température du modérateur.

Les calculs du coeur ont été effectués :

- Soit à deux dimensions avec contre-réactions par le modèle CRONOS qui fait l'enchaînement du calcul de coeur en diffusion basé sur la méthode des éléments finis, BILAN et du calcul thermohydraulique effectué par FLICA III ; ou sans contre-réactions par le seul calcul BILAN aux températures moyennes de 650°C pour le combustible et de 306°C pour le modérateur.

- Soit à trois dimensions avec contre-réactions par le même module CRONOS qui fait l'enchaînement du calcul de coeur en diffusion basé sur la méthode des éléments finis mais à trois dimensions, TRIDENT et du calcul thermohydraulique effectué par FLICA III.

<u>En ce qui concerne les calculs du coeur à deux dimensions, avec et sans contre-réactions</u>, nous constatons que la valeur calculée du facteur de multiplication effectif présente respectivement une dérive de 700 et 900 pcm. Les origines de cette dérive de réactivité peuvent être diverses :

- L'ajustement du ν du ^{239}Pu lors de la préparation des bilbiothèques évolutives n'est plus justifié comme il ressort des études de tendances récentes effectuées au SERMA [25], ce point augmenterait la dérive.

- La construction des bibliothèques évolutives avec une concentration moyenne en bore soluble de 600 ppm au lieu de la concentration réelle au long de l'évolution [26].

- Les ^{239}Pu et ^{236}U ne sont pas autoprotégés en évolution [27].

- La sous-estimation de l'efficacité initiale des poisons consommables.

- Surestimation de l'effet de puissance (effet Doppler, effet de température de modérateur et mise à l'équilibre du xénon).

- Diminution de la température effective du combustible en évolution ; telle que peut la faire apparaître un calcul thermomécanique du crayon (Comethe).

La confrontation entre les valeurs d'activités (calculées et expérimentales) fait apparaître l'importance de la prise en compte des contre-réactions. Les résultats obtenus sont satisfaisants.

En début de cycle, à 280 MWj/T, l'écart moyen calcul-expérience s'élève à 0.53 % et 2.04 % dans les assemblages respectivement enrichis à 2.1 % et 2.6 %. L'écart moyen en périphérie est de - 5.07 % et l'effet de damier de 1.5 %, [tableau (III.4)].

En fin de cycle, les résultats des calculs et de l'expérience convergent pour atteindre des écarts moyens inférieurs à 0.6 % au centre du coeur et - 1.02 % à sa périphérie. L'effet de damier devient inférieur à 0.5 %, [tableau (III.12)].

La comparaison des calculs BILAN et CRONOS met en évidence l'influence des contre-réactions sur les distributions de puissance, les valeurs d'activités et le taux de combustion.

Le calcul CRONOS, en début de cycle à 280 MWj/T, donne une distribution de puissance plus aplatie que le calcul BILAN ; mais l'effet dû aux contre-réactions sur la réactivité locale et le taux de combustion évoluant en cours de cycle, nous obtenons finalement en fin de cycle une convergence entre ces deux distributions de puissance, [tableau (III.25) et (III.27)].

Les écarts importants observés sur les valeurs des activités, issues de ces calculs, ont également été réduits en évolution, [tableaux (III.31) et (III.36)].

Pour les taux de combustion, en fin de cycle, BILAN sous-estime leurs valeurs au centre de 2 % mais les surestime en périphérie de 3 % à 5 % ; ce déséquilibre, pourra provoquer des erreurs lors du calcul des cycles ultérieurs, après repositionnement des assemblages, [tableau (III.37)].

Notre étude a été approfondie par certaines études complémentaires ; nous pourrons en tirer les remarques suivantes :

- Une représentation plus fine du couplage thermohydraulique n'influe que très peu sur les résultats des calculs de coeur, tant au niveau des valeurs d'activités, qu'au niveau de la distribution de puissance.

- une erreur éventuelle de + 5 % sur l'efficacité des grappes de poisons consommables peut être envisagée ce qui compense d'une part d'environ 350 pcm la dérive de réactivité, et d'autre part conduit à une distribution de puissance aplatie, réduisant ainsi les sous-estimations précédentes des valeurs d'activités dans les assemblages périphériques tout en respectant les mesures expérimentales au centre du coeur.

- L'ajustement du réflecteur au long du cycle, par diminution du coefficient de diffusion dans le groupe rapide D_1, réduit l'écart entre les valeurs d'activités calculées et expérimentales dans les assemblages périphériques, en début de cycle par l'aplatissement de la distribution de puissance qu'il entraîne.
  En évolution l'effet de correction devient moins important.
  Cet ajustement corrige l'écart constaté mais ne constitue pas une solution définitive. Celle-ci, en cours d'élaboration, nécessite un calcul de référence dans les géométries à une et deux dimensions.

En ce qui concerne le calcul du coeur à trois dimensions avec contre-réactions, effectué uniquement en début de cycle, la comparaison des distributions axiale d'activités théoriques et expérimentales dans les cinquante assemblages instrumentés, avec renormalisation par assemblage, fait apparaître un décalage d'environ 3 cm dans une vingtaine d'assemblages.

Ce décalage est indépendant du type et de la position de l'assemblage, il s'agit très probablement d'un problème de recalage de la cote de référence des mesures.

Une information complémentaire sur les conditions expérimentales et une analyse d'un plus grand nombre de configurations semblent nécessaires, en particulier en évolution.

La comparaison des résultats des calculs de coeur avec contre-réactions à deux et à trois dimensions (distribution radiale de puissance et d'activité), montre l'influence de la composante axiale du coeur. L'aplatissement de la distribution radiale de puissance réduit les écarts des valeurs d'activités entre le calcul et l'expérience, [tableaux (III.57) et (III.58)].

Il résulte de cette étude pour le premier cycle :

- Qu'en ce qui concerne le premier coeür où la distribution axiale des taux de combustion varie peu dans le coeur, un calcul de gestion à deux dimensions avec contre-réactions en imposant un laplacien axial uniforme et variable en évolution, sera suffisamment précis. Les options de calcul recommandés étant un maillage (2x2) mailles par assemblage avec les polynômes "Cubique Lagrange (CL16)".

  Mais dans le but de définir un schéma de calcul de gestion valable pour l'ensemble des cycles, l'évolution doit être calculée à trois dimensions avec couplage thermohydraulique.

- Qu'au vu des résultats obtenus à deux dimensions en évolution et à trois dimensions en début de cycle sur le coeur neuf, nous avons fixé le schéma de calcul suivant : calcul tridimensionnel avec couplage thermohydraulique, avec un maillage (1x1) maille par assemblage et polynômes d'interpolation "Cubique Lagrange (CL16)". C'est à partir des taux de combustion ainsi déterminés que l'étude du début du second cycle sera effectuée.

CHAPITRE IV

CALCUL DU COEUR EN DEBUT DE CYCLE 2

INTRODUCTION

Dans cette partie, on présentera les résultats de calcul de coeur en début de cycle 2.

Ces calculs sont effectués à deux dimensions avec contre-réactions, par le module CRONOS, en utilisant des bibliothèques évolutives à variations valables pour le cycle 2 et en adoptant le schéma de calcul défini au chapitre II.

Les résultats de calcul de coeur en début de cycle 2 sont intéressants dans la mesure où ils nous permettent de tester une situation de réacteur cumulant plusieurs effets :

- Effet de redistribution axiale de puissance.

- Conséquences des erreurs sur le calcul des taux de combustion radiaux et axiaux au cours du premier cycle.

- Effets divers de la dérive de réactivité, de l'influence des hétérogénéités, de l'interface coeur-réflecteur et des contre-réactions.

La figure (IV.1) représente la répartition des assemblages dans le coeur du réacteur au deuxième cycle, soit quatre régions d'enrichissements différents :

2.1 pour la région 1
2.6 pour la région 2
3.1 pour la région 3
3.25 pour la région 4.

Les taux de combustion intégrés axialement de ces assemblages en début du second cycle, après le repositionnement, figurent dans le tableau (IV.1). Ces taux de combustion sont issus, en fin de cycle 1, d'un calcul tridimensionnel avec couplage thermohydraulique, maillage (1x1) maille par assemblage et polynômes d'interpolation "Cubique Lagrange, (CL16)", [29].

	R	P	N	M	L	K	J	H	G	F	E	D	C	B	A
1							4	4	4						
2					4	4	4	H7 2	4	4	4				
3				4	4	J4 2	G10 2	H5 2	J10 2	G4 2	4	4			
4			4	P5 3	F11 2	E12 2	G15 3	F2 3	J15 3	L12 2	K11 2	E2 3	4		
5		4	4	E10 2	L2 3	K3 2	L3 3	H1 3	E3 3	F3 2	B5 3	L10 2	4	4	
6		4	M7 2	D11 2	N6 2	N4 3	G14 3	H3 2	J14 3	D3 3	C6 2	M11 2	D7 2	4	
7	4	4	F9 2	A9 3	N5 3	B9 3	D13 3	K2 3	N12 3	P9 3	C5 3	R9 3	K9 2	4	4
8	4	J8 2	L8 2	P6 3	R8 3	N8 2	P10 3	D12 1	B6 3	C8 2	A8 3	B10 3	E2 2	G8 2	4
9	4	4	F7 2	A7 3	N11 3	R7 3	C4 3	F14 3	M3 3	P7 3	C11 3	R7 3	K7 2	4	4
10		4	M9 2	D5 2	N10 2	M13 3	G2 3	H13 2	J2 3	C12 3	C10 2	M5 2	D9 2	4	
11		4	4	E6 2	P11 3	K13 2	L13 3	H15 3	E13 3	F13 2	E14 3	L6 2	4	4	
12			4	L14 3	F5 2	E4 2	G1 3	K14 3	J1 3	L4 2	K5 2	B11 3	4		
13				4	4	J12 2	G6 2	H11 2	J6 2	G12 2	4	4			
14					4	4	4	H9 2	4	4	4				
15							4	4	4						

Région 1 2.1 %

Region 2 2.6 %

Region 3 3.1 %

Région 4 3.25 %

X → Localisation au cycle 1.

Y → Nature de l'assemblage au cycle 2.

Figure IV.1 _ Repositionnement du cœur au cycle 2.

	H	G	F	E	D	C	B	A	
					9869	0			4
				9869	19191	0	0		5
			10798	17145	17449	19118	0		6
		10798	16291	15982	9492	19460	0	0	7
Assemblage central →	14396	14052	18836	12118	14052	19066	19060	0	8

Tableau IV.1 – Distribution des taux de combustion en début du cycle 2.

IV.1 - BIBLIOTHEQUES DU CYCLE 2 [22]

Au début du second cycle, les assemblages enrichis à 2.6 % et 3.1 % précédemment empoisonnés sont déchargés de leurs poisons consommables ; il a donc été nécessaire de créer de nouvelles bibliothèques pour ces assemblages qui auront vu du pyrex pendant un certain temps et qui, maintenant, vont évoluer sans poison.

Pour ces assemblages, le taux de combustion de retrait des poisons consommables va varier de 4 000 MWj/T à 24 000 MWj/T selon leur position dans le coeur pendant le premier cycle. Il faut donc envisager, pour chaque type d'assemblage un nombre important de bibliothèques différentes correspondant chacune à une valeur du taux de combustion de retrait des poisons consommables ; toutes ces bibliothèques doivent être évolutives et à contre-réactions.

Cependant l'encombrement et le temps de calcul nécessitent la recherche d'une solution plus simple. Il est possible de représenter un assemblage qui a évolué avec P crayons de poisons consommables jusqu'à certains taux de combustion (τ_i) par le même assemblage sans poisons consommables en ajoutant à la bibliothèque de ce dernier une table microscopique supplémentaire.

Cette table microscopique contient le terme correctif des sections efficaces de fission rapide et thermique et d'absorption thermique. La concentration de l'isotope supplémentaire est directement fonction du taux de combustion de retrait des poisons consommables (τ_i).

Cette méthode de calcul conduit à n'avoir qu'une bibliothèque unique par enrichissement d'assemblages empoisonnés du premier cycle, quel qu'ait été le nombre de crayons de poison consommable.

IV.2 - CALCUL DU COEUR EN DEBUT DE DEUXIEME CYCLE A DEUX DIMENSIONS

Le calcul du coeur en début de deuxième cycle à deux dimensions, deux groupes d'énergies (coupure 0.625 eV), 5 % de puissance nominale avec couplage thermohydraulique a été effectué par le module CRONOS.

Le maillage de calcul est (2x2) mailles par assemblage et les polynômes d'interpolation du flux sont "Cubique Lagrange (CL16)".

On a imposé la valeur de la concentration en bore critique (1 295 ppm).

Les fuites axiales du coeur ne sont pas géométriques ; il conviendrait de prendre une moyenne entre les fuites des assemblages irradiés jusqu'à la fin du cycle 1 (B^2 = 2.44 E-04) et les assemblages neufs ($B^2 = B_g^2$ = 0.68 E-04), ce qui conduit à imposer des fuites axiales intermédiaires (B^2 = 1.85 E-04) simulant l'usure axiale non uniforme des éléments combustibles.

Les constantes homogènes de réflecteur, calculées à des températures 306°C pour le modérateur et 650°C pour le combustible avec la table secondaire de bore soluble [chapitre III, III.2], ont été utilisées.

Si après un fonctionnement de longue durée, à un niveau de flux ϕ, on arrête le réacteur, (situation se produisant notamment en fin de cycle 1 pour le rechargement), le ^{149}Sm présent va croître pour atteindre une valeur limite S_{max}.

L'accumulation du ^{149}Sm, après arrêt en fin de cycle 1, a été calculée d'après la formule :

$$S_{max} = \gamma \frac{\Sigma_f}{\sigma_{as}} \left(1 + \frac{\sigma_{as}\,\phi}{\lambda_p}\right)$$

où σ_{as} est la section microscopique d'absorption de ^{149}Sm.

ϕ est le flux neutronique à la fin du premier cycle dans le coeur.

λ_p (3.633×10^{-6} s^{-1}) est la constante de décroissance du prométhéum.

IV.3 - INTERPRETATION DES RESULTATS

IV.3.1 - Résultats expérimentaux

Les valeurs expérimentales d'activités intégrées axialement pour les cinquante assemblages instrumentés sont donnés dans le tableau (IV.2).

Cette carte expérimentale d'activité, présente des valeurs d'activité différentes pour des assemblages présentant une symétrie dans le coeur. Nous éliminons cet effet de mesure en moyennant les valeurs d'activités sur tous les assemblages symétriques, tableau (IV.3), et en otant les points de mesures où l'écart est supérieur à 3 % par rapport à la valeur moyenne. En fait, en procédant ainsi, nous n'avons eu à supprimer qu'un seul point de mesure (E5), tableau (IV.4).

IV.3.2 - Résultats du calcul et comparaisons calcul-expérience

On note un retour à une valeur propre critique élevée (0.99966).

Nous avons comparé les valeurs d'activités calculées et les valeurs expérimentales ; dans le tableau (IV.5) on indique les valeurs expérimentales, les valeurs calculées et les écarts calcul-expérience.

On constate :

- Des écarts moyens au centre du coeur de 1.54 % pour les assemblages enrichis à 2.6 % et de 3.57 % pour les assemblages enrichis à 3.1 %.

- Un écart moyen de - 7.52 % pour les assemblages enrichis à 3.25 % en périphérie.

- Un effet de damier de 2 %.

Compte tenu du fait que le ν du ^{239}Pu a été modifié dans le calcul des bibliothèques du cycle 1 et que les recommandations actuelles résultant des études de tendance récentes [25] conduisent à nouveau à ne pas appliquer cet ajustement, nous avons annulé l'effet de cette modification sur le taux

de combustion en début du second cycle en augmentant ce dernier de 200 MWj/T dans chaque assemblage usé.

Le calcul de coeur effectué avec le taux de combustion corrigé de l'effet du ν du ^{239}Pu nous conduit à une valeur propre de 0.99859 ; les valeurs d'activités calculées ainsi que les écarts calcul-expérience sont donnés dans le tableau (IV.6), ou l'on remarque que les écarts moyens ont été améliorés ; soit :

- Des écarts de 1.54 % et 2.68 % respectivement pour les assemblages de centre enrichis à 2.6 % et à 3.1 %.

- Un écart moyen de - 6.27 % en périphérie.

- L'effet de damier est de 1 %.

Les valeurs d'activités calculées, tableau (IV.6) ont été corrigées pour l'effet 2D/3D afin de prendre en considération la redistribution axiale de puissance.

Ces valeurs d'activités ainsi que les écarts calcul-expérience figurent dans le tableau (IV.7).

On remarque que l'effet de correction 2D/3D n'est pas négligeable en ce qui concerne les valeurs d'activité ; on note :

- Des écarts moyens de 1.53 % pour les assemblages enrichis à 2.6 % et 1.02 % pour les assemblages enrichis à 3.1 %.

- Un écart moyen de - 3.85 % dans les assemblages en périphérie.

- L'effet de damier n'existe plus.

Enfin, dans le tableau (IV.8), nous avons représenté les écarts calcul-expérience de ces mêmes valeurs d'activités [tableau (IV.7)] mais avec la carte expérimentale d'activité corrigée afin de réduire au mieux l'effet des erreurs de mesure. Nous constatons que les écarts en périphérie sont de l'ordre de - 4 %, (écart maximum de - 8.11 %), par contre dans le reste du coeur les écarts calcul-expérience sont inférieurs à 3 % (nous remarquons toutefois un point, F6, à 4.27 %).

	R	P	N	M	L	K	J	H	G	F	E	D	C	B	A
1								0.915							
2										1.034					
3				0.813			0.964	0.954				0.792			
4					0.955			1.070		0.915					
5			1.192		1.003		1.048				0.961	0.929		0.762	
6					1.017			1.056		1.055					
7			1.001				1.179		1.131			1.064		1.237	
8	0.962		0.992		1.134					1.081			0.952	1.024	
9					1.052				1.171	1.073					0.802
10			1.006				1.053					0.955		1.065	
11					1.002			1.110		1.002	1.001				
12			0.826				1.060					0.972	0.827		
13								0.957		1.014					
14					0.790				1.268						
15							0.807								

Tableau IV.2 _ Carte expérimentale d'activité.

	R	P	N	M	L	K	J	H	G	F	E	D	C	B	A
1								0.938							
2										1.050					
3				0.814			0.983	0.964				0.814			
4					0.942			1.070		0.935					
5			1.191		0.992		1.050				0.992	0.942		0.776	
6					1.009			1.068		1.055					
7			0.983				1.160		1.160			1.062		1.252	
8	0.938		0.964		1.122					1.068			0.964	1.024	
9					1.050				1.160	1.063					0.804
10			1.010				1.063					0.935		1.050	
11					0.992			1.122		1.009	0.992				
12			0.814				1.062					0.972	0.814		
13								0.964		1.010					
14					0.776				1.252						
15							0.804								

Tableau IV.3 – Carte expérimentale d'activité rabattue par symétrie.

	R	P	N	M	L	K	J	H	G	F	E	D	C	B	A
1								0.938							
2										1.050					
3				0.814			0.983	0.964				0.814			
4					0.942			1.070		0.935					
5			1.191		1.002		1.050				1.002	0.942		0.776	
6					1.009			1.068		1.055					
7			0.983				1.160		1.160			1.062		1.252	
8	0.938		0.964		1.122					1.068			0.964	1.024	
9					1.050				1.160	1.063					0.804
10			1.010				1.063					0.935		1.050	
11					1.002			1 122		1.009	1.002				
12			0.814				1.062					0.972	0.814		
13								0.964		1.010					
14					0.776				1.252						
15							0.804								

Tableau IV. 4 _ Carte expérimentale d'activité corrigée.

CALCUL : C *
EXP : E *
(C-E)/E (%): *

PLAN 1
2D CR C2

0. MWJ/T
5. % PN
1295. PPM

							0.8757 0.9146 -4.25							
									1.0080 1.0342 -2.53					
			0.7208 0.8125 -11.28			1.0008 0.9644 3.78	0.9768 0.9536 2.43				0.7208 0.7922 -9.01			
				0.9467 0.9552 -0.89			1.1033 1.0700 3.12		0.9515 0.9154 3.94					
		1.1460 1.1915 -3.82		0.9930 1.0032 -1.02		1.0911 1.0480 4.11				0.9930 0.9607 3.36	0.9467 0.9294 1.87		0.7028 0.7622 -7.79	
				1.0226 1.0169 0.57			1.1388 1.0557 7.88		1.1521 1.0554 9.16					
		1.0008 1.0007 0.01				1.2425 1.1791 5.38		1.2425 1.1306 9.90			1.0968 1.0641 3.08		1.2394 1.2365 0.24	
0.8757 0.9620 -8.96		0.9768 0.9919 -1.53		1.1675 1.1335 3.00					1.1388 1.0807 5.38			0.9768 0.9516 2.65	1.0318 1.0235 0.82	
				1.0911 1.0523 3.70				1.2425 1.1709 6.11	1.1351 1.0734 5.74					0.7186 0.8018 -10.38
		0.9871 1.0060 -1.88				1.1351 1.0528 7.82					0.9515 0.9551 -0.38		1.0080 1.0650 -5.35	
				0.9930 1.0017 -0.87			1.1675 1.1097 5.21		1.0226 1.0019 2.07	0.9930 1.0011 -0.82				
		0.7208 0.8255 -12.68				1.0968 1.0600 3.47					0.9117 0.9720 -6.20	0.7208 0.8274 -12.88		
							0.9768 0.9569 2.08		0.9871 1.0136 -2.61					
				0.7028 0.7897 -11.00				1.2394 1.2676 -2.22						
						0.7186 0.8067 -10.93								

TABLEAU IV.5 - COMPARAISON DES ACTIVITÉS EXPÉRIMENTALES ET CALCULEES EN DÉBUT DU CYCLE 2.

CALCUL : C *
EXP : E *
(C-E)/E (%): *

PLAN 1
2D CR C2

0. MWJ/T
5. % PN
1295. PPM

							0.8917 0.9146 -2.50							
									1.0219 1.0342 -1.19					
			0.7275 0.8125 -10.47			1.0054 0.9644 4.25	0.9802 0.9536 2.78				0.7275 0.7922 -8.17			
				0.9473 0.9552 -0.83			1.0992 1.0700 2.74		0.9492 0.9154 3.69					
		1.1566 1.1915 -2.93		0.9870 1.0032 -1.62		1.0856 1.0480 3.58				0.9870 0.9607 2.73	0.9473 0.9294 1.93		0.7126 0.7622 -6.51	
				1.0141 1.0169 -0.27			1.1239 1.0557 6.46		1.1373 1.0554 7.76					
		1.0054 1.0007 0.47				1.2195 1.1791 3.43		1.2195 1.1306 7.87			1.0922 1.0641 2.64		1.2568 1.2365 1.64	
0.8917 0.9620 -7.30		0.9302 0.9919 -1.18		1.1595 1.1335 2.29					1.1239 1.0807 3.99			0.9802 0.9516 3.01	1.0445 1.0235 2.06	
				1.0856 1.0523 3.16				1.2195 1.1709 4.15	1.1202 1.0734 4.35					0.7320 0.8018 -8.70
		0.9933 1.0060 -1.26				1.1202 1.0528 6.40					0.9492 0.9551 -0.62		1.0219 1.0650 -4.05	
				0.9870 1.0017 -1.48			1.1595 1.1097 4.48		1.0141 1.0019 1.22	0.9870 1.0011 -1.42				
		0.7275 0.8255 -11.88				1.0922 1.0600 3.03					0.9144 0.9720 -5.93	0.7275 0.8274 -12.07		
							0.9802 0.9569 2.44		0.9933 1.0136 -2.00					
				0.7126 0.7897 -9.77				1.2568 1.2676 -0.85						
						0.7320 0.8067 -9.26								

TABLEAU IV.6 - COMPARAISON DES ACTIVITÉS EXPÉRIMENTALES ET CALCULÉES EN DÉBUT DU CYCLE 2 AVEC EFFET DE CORRECTION DU ν DU ^{239}Pu.

	R	P	N	M	L	K	J	H	G	F	E	D	C	B	A
1								0.914 -0.10							
2										1.048 1.32					
3				0.748 -8.00			1.011 4.87	0.981 2.89				0.748 -5.64			
4					0.956 0.12			1.088 1.70		0.949 3.69					
5			1.183 -0.75		0.979 -2.41		1.068 1.87				0.979 1.90	0.956 2.89		0.736 -3.49	
6					0.999 -1.75			1.099 4.09		1.100 4.25					
7			1.011 1.07				1.183 0.29		1.183 4.59			1.082 1.70		1.280 3.50	
8	0.914 -5.02		0.981 -1.08		1.141 0.62					1.090 1.68			0.981 3.11	1.055 3.03	
9					1.068 1.45				1.183 0.99	1.093 1.84					0.752 -6.21
10			1.008 0.23				1.093 3.84					0.949 -0.62		1.048 -1.61	
11					0.979 -2.27			1.141 2.78		0.999 -0.28	0.979 -2.21				
12			0.748 -9.45				1.082 2.09					0.927 -4.59	0.748 -9.66		
13								0.981 2.54		1.008 -0.52					
14					0.736 -6.85				1.280 0.96						
15							0.752 -6.78								

Tableau IV.7 _ Carte d'activité corrigée pour l'effet ν du ^{239}Pu et 2D/3D.

	R	P	N	M	L	K	J	H	G	F	E	D	C	B	A
1								-2.56							
2										-0.19					
3				-8.11			2.85	1.76				-8.11			
4					1.49			1.68		1.50					
5			-0.67		-2.30		1.71				-2.30	1.49		-5.15	
6					-0.99			2.90		4.27					
7			2.85				1.98		1.98			1.88		2.24	
8	-2.56		1.76		1.69					2.90			1.76	3.03	
9					1.71				1.98	2.82					-6.47
10			-0.20				2.82					1.50		-0.19	
11					-2.30			1.69		-0.99	-2.30				
12			-8.11				1.88					-4.63	-8.11		
13								1.76		-0.20					
14					-5.15				2.24						
15							-6.47								

Tableau IV.8 – Ecart entre la carte d'activité corrigée pour l'effet ν du ^{239}Pu et 2D/3D et la carte expérimentale corrigée.

CONCLUSION

Le calcul du coeur en début de cycle 2 a été effectué à deux dimensions avec contre-réactions par le module CRONOS.

On note un retour à une valeur propre critique élevée (0.99859). Cet effet n'est pas en contradiction avec l'analyse de la dérive de réactivité au cours du premier cycle, effectuée précédemment.

En effet, par rapport à la valeur propre critique du coeur neuf sans puissance soit environ 1.000, on se trouve dans des conditions voisines vis-à-vis des paramètres associés à la dérive (sauf pour les poisons).

- Titre en bore soluble élevé.

- Puissance nulle (donc pas d'erreur sur l'effet de puissance ni sur la température effective).

- Un tiers de combustible neuf, ce qui réduit légèrement les effets liés à l'autoprotection.

De plus, l'erreur sur la distribution de puissance radiale au cycle 1 mène à une légère sous-estimation du taux de combustion moyen.

La comparaison entre les valeurs d'activités calculées et les valeurs expérimentales montre des écarts moyens au centre du coeur de 1.54 % et 2.68 % respectivement pour les assemblages enrichis à 2.6 % et 3.1 %, l'écart moyen dans les assemblages périphériques est, plus important de - 6.27 % et l'effet de damier au centre du coeur est de 1 % [tableau (IV.6)].

La carte d'activité calculée a ensuite été corrigée par l'effet 2D/3D, qui revient à prendre en compte la redistribution axiale de puissance, ce qui conduit à améliorer les résultats par rapport à l'expérience ; les écarts moyens au centre du coeur sont de 1.53 % pour les assemblages enrichis à 2.6 % et de 1.02 % pour les assemblages enrichis à 3.1 %, l'écart moyen en périphérie n'est plus que - 3.85 % (écart maximum de - 6.47 %) et l'effet de damier est inexistant, [tableau (IV.8)].

<u>L'analyse de la comparaison entre le calcul et l'expérience en début de cycle 2 fait apparaître les éléments suivants</u> :

. <u>Evolution de la valeur propre critique</u> : On constate un retour à une valeur élevée, qui peut être en grande partie expliqué par les éléments d'analyse proposés pour la dérive au cours du cycle 1, auxquels s'ajoute un effet dû aux erreurs commises sur la distribution radiale des taux de combustion au cours de ce même cycle 1. Néanmoins, pour expliquer complètement l'effet de remontée de la valeur propre critique, une analyse de tendances quantitative est nécessaire. Pour être fondée, elle doit s'appuyer sur l'interprétation d'une série de cycles sur plusieurs tranches (tendance d'évolution au cours du deuxième cycle reprise au début du troisième cycle...).

. <u>Distribution d'activités</u> : La carte théorique d'activités, une fois pris en compte l'effet 2D/3D et la correction portant sur le ν du ^{239}Pu montre un assez bon accord avec l'expérience (écart moyen d'environ 1.53 %, 1.02 % pour les deux lots composant le centre du coeur et - 3.85 % pour le lot périphérique, tableau (IV.8)).

Un ajustement permanent et très faible du réflecteur paraitrait justifié sur l'ensemble : cycle 1 et début de cycle 2. Une étude plus approfondie du réflecteur à deux dimensions est souhaitable.

Une prise en compte des erreurs sur la distribution radiale des taux de combustion au cours du cycle 1 serait également profitable.

L'effet 2D/3D à basse puissance est dû à la distribution axiale non uniforme des taux de combustion des lots usés et au pic de puissance et d'importance vers le haut du coeur à basse puissance. L'amplitude de cet effet, qui doit diminuer à pleine puissance dépend en partie de l'historique du cycle 1 (stretch-out...).

CONCLUSION GENERALE

L'objectif de ce travail était la définition d'un schéma de calcul optimisé et actualisé pour le suivi des réacteurs à eau légère pressurisées.

Faisant suite à des études déjà entreprises sur ce type de réacteur de puissance, nous avons donné à ce travail les orientations spécifiques suivantes :

- d'une part, le coeur étudié formé d'un réseau 17 x 17 est celui du réacteur FESSENHEIM 2, représentatif de l'ensemble des réacteurs à eau légère pressurisée de conception récente ;

- d'autre part, notre étude a porté sur la comparaison et l'interprétation des résultats de calculs et des mesures expérimentales des distributions d'activités des chambres de fission, seules grandeurs directement accessibles par l'expérience.

L'étude a porté sur :

- les expériences de démarrage du coeur neuf interprétées avec des calculs à deux et à trois dimensions ;

- l'évolution du premier cycle, suivie avec des calculs à deux dimensions (qui ont dû être comparés avec des calculs à trois dimensions, en particulier vis-à-vis de la distribution des taux de combustion) ;

- le calcul du coeur en début de cycle 2 à basse puissance.

L'ensemble des points traités est donc représentatif de l'essentiel des problemes rencontrés au cours d'une étude de suivi de coeur.

<u>Expériences de démarrage sur le coeur neuf</u> : l'étude de sensibilité est faite sur le coeur à deux dimensions en début de vie (taux de combustion et puissance nuls), notre but étant d'obtenir un schéma de calcul utilisable aussi bien en début de vie qu'au cours de l'évolution du réacteur.

Tout d'abord en ce qui concerne la carte expérimentale d'activité nous nous sommes efforcés de réduire autant que possible les effets des défauts de mesure en respectant les symétries du réacteur et en tenant compte de l'expérience de plusieurs tranches (FESSENHEIM 1, FESSENHEIM 2, BUGEY 2).

⟶ La confrontation des résultats calcul-expérience fait ressortir la nécessité de prendre en compte au niveau du calcul de transport de l'assemblage et de l'obtention des constantes neutroniques, la présence physique de la chambre de fission et la représentation explicite de la lame d'eau inter-assemblage.

⟶ Au niveau du calcul de coeur complet, on peut toutefois omettre la représentation explicite de la chambre de fission à condition de tenir compte des perturbations locales de flux liées à sa présence.

Le choix du degré des polynômes d'interpolation de flux et du maillage de calcul, bien que n'ayant que peu d'effet sur le flux moyen dans l'assemblage influe de façon notable sur le calcul du gradient de flux dans celui-ci.

⟶ Ensuite il a été nécessaire de corriger la carte d'activité calculée en diffusion par BILAN par les effets du couplage thermohydraulique et l'effet 2D/3D, à partir d'un calcul à trois dimensions ; on a pu mettre ainsi en évidence les effets 2D/3D, qui sont limités au cours du premier cycle.

⟶ Nous avons ainsi réduit les écarts moyens calcul-expérience à - 0,22 % et 1,5 % dans les assemblages respectivement enrichis à 2,1 % et à 2,6 % et - 2,85 % dans les assemblages périphériques.

<u>Ce qui nous a conduit à adopter le schéma de calcul suivant</u> :

- obtention des constantes neutroniques des assemblages par un calcul multicellule sans représentation explicite de la chambre de fission avec certaines hypothèses ;

- calcul du coeur à deux dimensions par la méthode des éléments finis en utilisant des polynômes "cubiques Lagrange (CL16)" et un maillage de calcul 2 x 2 mailles par assemblage.

La validité du schéma ainsi défini a été testée en évolution pour le cycle 1, notre but étant d'obtenir le traitement automatique et de routine pour l'ensemble des cycles.

→ La comparaison des calculs de coeur à deux dimensions en évolution avec et sans contre-réactions confirme la nécessité de prendre en compte ces dernières.

Toutefois une représentation fine du couplage thermohydraulique ne se justifie pas.

→ La valeur calculée du facteur de multiplication effectif K_{eff} présentant une dérive en évolution (700 pcm), celle-ci peut avoir des origines diverses : ajustement ou non du ν du ^{239}Pu, concentration en bore moyenne et non réelle, les ^{239}Pu et ^{238}U ne sont pas autoprotégés en évolution, sous-estimation de l'efficacité initiale de poisons consommables, surestimation de l'effet de puissance, diminution de la température effective du combustible en évolution.

→ En ce qui concerne le calcul de coeur avec contre-réactions à trois dimensions, effectué uniquement en début de vie la comparaison axiale des activités calculées et expérimentales semble faire apparaître un léger décalage, indépendant du type et de la position de l'assemblage dans le coeur.

Il résulte de la confrontation des résultats des distributions d'activités calculées et expérimentales sur l'évolution du cycle 1, qu'en ce qui concerne ce premier coeur, un calcul de gestion à deux dimensions avec contre-réactions et utilisant les options de calcul définies en début de vie s'avère suffisamment précis.

Dans le but de définir un schéma de calcul de gestion valable aux cycles ultérieurs, où des problèmes tridimensionnels plus importants peuvent apparaître, l'évolution a été faite à trois dimensions, avec couplage thermohydraulique avec les mêmes polynômes d'interpolation de flux mais en réduisant le maillage à 1 x 1 maille par assemblage, essentiellement pour obtenir une distribution tridimensionnelle des taux de combustion.

En dernier lieu, le calcul du coeur en début de cycle 2 nous a permis de valider le schéma de calcul établi au cycle 1. Ce calcul a été effectué à deux dimensions avec contre-réactions.

→ Les résultats obtenus après correction par l'effet 2D/3D, prenant en compte l'effet de redistribution axiale de puissance, conduisent à des écarts moyens calcul-expérience de 1,53 % et 1,02 % pour les assemblages enrichis à 2,6 % et 3,1 %, et à un écart moyen de - 3,35 % en périphérie.

En résumé, les résultats obtenus s'avèrent satisfaisants :

- L'interprétation directe des cartes expérimentales d'activités en évolution à l'aide d'un calcul de coeur tridimensionnel (ou bidimensionnel en dehors de quelques situations particulières) avec prise en compte des contre-réactions, donne une précision suffisante au centre du coeur.

En périphérie, il apparait une légère tendance à sous-estimer l'activité expérimentale de mesure. Elle pourrait être corrigée de façon systématique, et cette correction dépend sans doute du calcul de l'interface coeur-réflecteur à deux dimensions.

- La dérive de réactivité au cours du premier cycle ne fait pas apparaître de tendance nouvelle.

Toutefois dans le but de compléter notre étude, il serait intéressant d'approfondir plusieurs problèmes :

- <u>Sur le plan de l'étude expérimentale</u>

Une information complémentaire sur la position et la cote des grilles lors des mesures ainsi que l'analyse d'un plus grand nombre de configurations permettraient de résoudre le problème du décalage des points de mesure et des points calculés axialement.

L'interprétation des débuts de cycles et des évolutions d'autres tranches serait profitable afin d'élargir la base statistique des analyses de tendances.

- <u>Sur le plan des données physiques et des méthodes de calcul</u>

Une reprise de l'étude permettrait d'intégrer les améliorations récentes déjà apportées au système NEPTUNE, ou en cours d'achèvement :

. prise en compte des analyses de tendances les plus récentes sur les bibliothèques,

. utilisation des nouveaux modules de calcul APOLLO de l'assemblage (EURYDICE, ROTH 4),

. utilisation de la bibliothèque à nombre de groupes réduit,

. mise en oeuvre de MICRO-APOLLO (procédure de calcul des bibliothèques multiniveaux intégrée à APOLLO),

. test et utilisation de polynômes d'interpolation plus performants dans CRONOS (parabolique Lagrange PLS ≈).

Enfin, il est nécessaire d'étendre la qualification aux produits et aux situations qui apparaissent avec le développement de l'exploitation du parc électronucléaire :

- réacteurs CP1,
- suivi de charge et téléréglage avec pilotage en mode gris,
- réacteurs de 1300 MW.

Au cours de cette étape, il sera nécessaire de qualifier aussi bien le schéma de calcul de référence que les procédures simplifiées conduisant à des études de gestion souples et efficaces.

o

o o

REFERENCES

[1] DUCHENE J. - VERDANT R.
"Détecteurs de rayonnements pour les mesures en coeur des réacteurs de puissance".
Rapport CEA-R-5021

[2] DUCHENE J.
"Chambres à fission miniatures pour le contrôle des réacteurs à eau ordinaire".
CEA BIST/195, Septembre 1974.

[3] HOFFMANN A. - JEANPIERRE F. - KAVENOKY A. - LIVOLANT M. - LORAIN H.
"APOLLO : Code multigroupe de résolution de l'équation du transport pour les neutrons thermiques et rapides".
Rapport SERMA n° 1193 "T"

[4] DILLET C. - DUMAS M. - KAVENOKY A. - LAUTARD J. - QUILICHINI P. - RAVIER M. - RIEUNIS J.
"NEPTUNE : Un système modulaire pour le calcul des réacteurs à eau".
Rapport SERMA/SPM n° 228 "DR" - Version B

[5] ROTH M. J.
"The estimation of collision probabilities in complicated geometries"
UK Atomic Energy Authority, WINFRITH, 1969
AEEW-M-857

[6] SANCHEZ R.
"Approximate solution of the two dimensional transport equation by collision probability methods"
Nucl. Sci. Eng. 64, n° 2, 1977

[7] BOIVINEAU A. - SANCHEZ R.
"Apollo 2D : Mode d'utilisation des modules Nusicaa et Caliope"
Note SERMA/SPM n° 1014 "DR", Septembre 1977

[8] KAVENOKY A.
"Calcul et utilisation des probabilités de première collision pour des milieux hétérogènes à une dimension : les programmes ALCOLL et CORTINA"
Note CEA-N-1077

[9] STANKOVSKI Z.
"Traitement bidimensionnel de transport des neutrons par la méthode de GALERKIN"
Thèse, Université de BELGRADE, 1977.

[10] SANTAMARINA A.
"Calcul des assemblages PWR - Qualification du système Neptune sur les expériences MELODIE dans MINERVE"
Rapport SEN-071, Janvier 1979

[11] TOURNIER D.
"Contribution à la qualification du système Neptune. Application au suivi de TSHANGE"
Thèse, Université d'ORSAY, 1980

[12] MONDOT J.
"EQUIPAGE : Determination des constantes équivalentes pour les calculs de diffusion aux différences finies en géométrie XY"
Note technique SEN/LPN - 77/031.

[13] LAUTARD J.
"Application de la méthode des éléments finis à la résolution de l'équation de diffusion à 2 et 3 dimensions".
Rapport à paraître.

[14] KAVENOKY A. - LAUTARD J. - MANUEL A. - ROBEAU D.
"NEPTUNE : Les modules ELECTRE et CRONOS pour les calculs stationnaires et transitoires de distribution de puissance avec prise en compte des contre-réactions thermohydrauliques".
Paris, OCDE, Novembre 1979.

[15] MANUEL A. - ROBEAU D.
"Développement NEPTUNE 0.2 : Utilisation du module CRONOS pour les calculs de régime stationnaire avec couplage neutronique thermo-hydraulique".
Note SERMA/SPM n° 1199, "DR", Mai 1979.

[16] PLAS R.
"FLICA III : Programme pour l'étude thermohydraulique de réacteurs et de boucles d'essais".
Note CEA-N-1802, Mai 1975.

[17] ARRIOLA A.
"Etude expérimentale de caractéristiques neutroniques de réseaux de réacteurs à eau pressurisée".
Thèse, Université d'ORSAY, 1978.

[18] REUSS P.
"Schéma standard du calcul neutronique des réacteurs à neutrons thermiques".
Note SERMA/SPM n° 900 "T", Février 1977.

[19] REUSS P.
"Aide-mémoire pour le calcul des constantes de réflecteur par la méthode de NISAN".
Note SERMA/SPM n° 644 "T".

[20] NISAN S. - REUSS P.
"Une nouvelle méthode pour le calcul de l'interface coeur-réflecteur. Mise au point du programme REFLEC pour la représentation du système baffle + réflecteur par un milieu équivalent homogène".
Rapport SERMA/SPM n° 265 "T".

[21] LEBIGOT Ch. - LEFEBVRE J.C.
"Tranches PWR, études de coeur nouveau, mode de calcul des réflecteurs".
Note technique EDF-SEPTEN-TB. 78-02

[22] JAGER D.
Communication personnelle

[23] DETOC M.
"Developpement de NEPTUNE 0.2 : Module trisynthèse".
Note SERMA/SPM n° 918 "T", Mai 1978.

[24] TELLIER H. - GRANDOTTO BIETTOLI M. - VANUXEEM J.
"Une étude du désaccord entre les valeurs calculées et mesurées de l'intégrale effective de capture de l'Uranium 238".
Note CEA-N-2078.

[25] REUSS P.
"Etude physique du recyclage du Plutónium dans les réacteurs à eau"
Note CEA-N-2098, Octobre 1979.

[26] BASIUK M. J. - KAVENOKY A. - REUSS P.
"Remarques sur le calcul d'évolution d'un coeur de réacteur à eau"
Note SERMA/SPM n° 1360 "T"

[27] BERGERON J.
"Evolution d'un crayon PWR : Influence de l'autoprotection des résonances des corps à faible contribution".
Note SERMA n° 1338 "T".

[28] LOTTIN A.
"Constantes neutroniques des réflecteurs de PWR pour le calcul de diffusion à trois dimensions"
Note SERMA/SEREL n° 1157.

[29] MITAUT P.
Communication personnelle.

[30] PANEK H.
"Qualification du système NEPTUNE
- Interprétation d'expériences critiques
- Calculs de coeur de réacteurs de puissance
Ebauche d'une nouvelle chaîne de calcul basée sur les codes APOLLO et TORTISE
- Premiers tests sur coeur de PWR".
Thèse, Université d'ORSAY, Février 1978
Note CEA-N-2092.

A N N E X E

LISTING D'UN CALCUL APOLLO SUR L'ASSEMBLAGE

ANNEXE XI — Calcul APOLLO multicellule à 99 groupes

Assemblage 2.6 % à 16 crayons de poison

```
NEPTUNE PREND DYNAMIQUEMENT LE CONTROLE
     = PROC BGYPURA  CREAT                                                         =
     =DEFG MULTICEL GEOM CYLI MULTICEL  1.  8                                      =
     =.0553633  RP1 1 RP2 2 RP3 1 RP4 1 RP5 1 RP6 1                                =
     =       SIJ   0.  0.  1.  0.  0.  0.  0.  0.                                  =
     =.0311419  RT1 1 RT2 1 RT3 1                                                  =
     =       SIJ   0.  0.  0.  1.  0.  0.  0.  0.                                  =
     =.2214532  RC31 1 RC32 1 RC33 1                                               =
     =   SIJ   .25  0.  .1875  .125  .375  0.  .03125  .03125                      =
     =.1245674  RC31 1 RC32 1 RC33 1                                               =
     =   SIJ   0.  .25  .2222222  0.  .0555555  .44444444  0.  .0277777            =
     =.1660899  RC31 1 RC32 1 RC33 1                                               =
     =   SIJ   0.  0.  .5  .0416666  0.  .2916666  .0833333  .0833333              =
     =.1107266  RC31 1 RC32 1 RC33 1                                               =
     =   SIJ   0.  0.  0.  .5  .4375  0.  0.  .0625                                =
     =.0692042  RC31 1 RC32 1 RC33 1                                               =
     =   SIJ   0.  0.  .1  0.  .2  0.  .4  .3                                      =
     =.2214532  RC31 1 RC32 1 RC33 1   RC34 1                                      =
     =   SIJ   0.  0.  .030612  .015306  .061244  .030612  .091837  .770409        =
     =FIND                                                                         =
     =  DEFC  OXYG CONC  16 1.  10 1 TECO                                     FIND=
     =  DEFC  U235 CONC 235 1. 510 1 TECO 1235 10                             FIND=
     =  DEFC  U236 CONC 236 1.  10 1 TECO                                     FIND=
     =  DEFC  NP37 CONC 237 1.  10 1 TECO                                     FIND=
     = DEFC U238 CONC 100238  1. 510 1 TECO 2238  10     FIND                     =
     =  DEFC  PU38 CONC 438 1.  10 1 TECO                                     FIND=
     =  DEFC  PU39 CONC 339 1.  510 1 TECO 1239 10            FIND                =
     =  DEFC  PU40 CONC 340 1.  10 1 TECO                                     FIND=
     =  DEFC  PU41 CONC 241 1.  10 1 TECO                                     FIND=
     =  DEFC  PU42 CONC 342 1.  10 1 TECO                                     FIND=
     =  DEFC  AM41 CONC 341 1.  10 1 TECO                                     FIND=
     =  DEFC  P338 CONC 438 1.  10 1 TECO                                     FIND=
     =  DEFC  P339 CONC 339 1.  10 1 TECO                                     FIND=
     =  DEFC  K39  CONC  39  1.  10  0  TEMO                  FIND                =
     = DEFC B10 CONC 10 1. 10 0 TEMO   FIND                                       =
     =  DEFC  B111  CONC  111  1.  10  0  TEMO               FIND                 =
     =  DEFC  NA23  CONC  23  1.  10  0  TEMO                FIND                 =
     =  DEFC  P340 CONC 340 1.  10 1 TECO                                     FIND=
     =  DEFC  AM42 CONC 442 1.  10 1 TECO                                     FIND=
     =  DEFC  AM43 CONC 243 1.  10 1 TECO                                     FIND=
     =  DEFC  CM42 CONC 1002 1. 10 1 TECO                                     FIND=
     =  DEFC  CM43 CONC 1003 1. 10 1 TECO                                     FIND=
     =  DEFC  CM44 CONC 244 1.  10 1 TECO                                     FIND=
     =  DEFC  PF43 CONC 1004 1. 10 1 TECO                                     FIND=
     =  DEFC  SM9P CONC 2026 1. 10 0 TECO                                     FIND=
     =  DEFC  XE35 CONC 2121 1. 10 0 TECO                                     FIND=
     =  DEFC  GD55 CONC 100155 1. 10 0 TECO                                   FIND=
     =  DEFC  CFU5  CONC  235        1. 10 0 TEMO            FIND                 =
     =  DEFC  AL27 CONC  27 1.  10 0 TEMO                                     FIND=
     =  DEFC  SI28 CONC  28 1.  10 0 TEMO                                     FIND=
     =  DEFC  TI48 CONC  48 1.  10 0 TEMO                                     FIND=
     =  DEFC  CR52 CONC  52 1.  10 0 TEMO                                     FIND=
     =  DEFC  MN55 CONC  55 1.  10 0 TEMO                                     FIND=
     =  DEFC  FE56 CONC  56 1.  10 1 TEMO                                     FIND=
     =  DEFC  NI58 CONC  58 1.  10 0 TEMO                                     FIND=
     =  DEFC  CO59 CONC  59 1.  10 0 TEMO                                     FIND=
     =  DEFC  ZR91 CONC  91 1. 110 0 TEMO 1191 10   40.  1.                   FIND=
     =  DEFC  NB93 CONC  93 1.  10 0 TEMO                                     FIND=
     =  DEFC  MO96 CONC  95 1.  10 0 TEMO                                     FIND=  **9
```

Isotopes contenus dans les différents milieux

```
=  DEFC  BNAT CONC  11 1.  10 0 TEMO                                 FIND       =
=  DEFC   EAU CONC  18 1. 100010 2 TEMO                                      FIND=
=  DEFC ABSPF CONC  728 1. 10 0 TEMO                                         FIND=
=  DEFC BIDON CONC 1001 1. 10 0 TEMO                                         FIND=
=  DEFC SS304 PROP FE56 0.7060 NI58 0.1000 CR52 0.1800                          =
=                  MN55 0.0100 SI28 0.0040                                   FIND=
=  DEFC IN718 PROP NI58 0.5250 CR52 0.1900 CO59 0.0005                          =
=                  SI28 0.0018 MO96 0.0305 TI48 0.0038                          =
=                  AL27 0.0050 MN55 0.0018 FE56 0.1823                          =
=         NB93 0.05175 BNAT 0.00003 BIDON 0.00252 FIND                          =
=  DEFC   ZR4 PROP CR52 0.0010  FE56 0.0021  OXYG  0.00125                      =
=                  ZR91 0.98115 BIDON 0.0145                                 FIND=
=  DEFC   GAP PROP ZR91 1.                                                   FIND=
=  DEFC OXYDE FONC OXYG 2.                                                   FIND=
= DEFC AG7 CONC 107 1. 110 0 TEMO 1107   10 62.73 1.219                      FIND=
= DEFC AG9 CONC 109 1. 110 0 TEMO 1109   10 65.93 1.191                      FIND=
= DEFC IN15 CONC 2077 1.  10 0 TEMO                                          FIND=
= DEFC CON CONC 114 1. 10 0 TEMO                                             FIND=
-DEFI CALMULT 1 SOU0 SOU1 SOU2 BARREAU 0       FIND                             =
= DEFI  SOU0  0.  0.  0.  0.  0.  0.  0.  0.  0.  0.   FIND                     =
= DEFI SOU1 1. 0. 0. 1. 0. 0. 1. 0. 0. 1. 0. 0.    FIND                         =
= DEFI SOU2 1. 0. 0. 1. 0. 0. 0.    FIND                                        =
=  DEFI MACRO4 4 2.4 7.6 16.58809 25.23312      FIND                            =
=  DEFI MACRO2 2 16.58809 25.23312                                           FIND=
=  DEFI MAIL MAILLAGE 47 10 99 52                                            FIND=
=  DEFI STANDARD                  APOLLO KEFF FUITE BEUN                     FIND=
=  DEFI PF                                                                      =
=   CHAINE   19  5  5                                                           = Chaîne d'évolution
= U235   -235   92  235    0.                                                   =
= U236    236   92  236    0.                                                   =
= U238 -100238 92 238   0. -1  0.01                                             =
= NP37    237  -93  237  2 0.                                                   =
= PU38    438  -94  238  1 0.                                                   =
= PU39   -339  -94  239  3 0.  1 0.002                                          =
= PU40    340   94  240    0.                                               =
= PU41   -241   94  241    0.145                                                =
= AM41    341   95  241    0.                                                   =
= PU42    342  -94  242  1 0.                                                   =
= AM42   -442  -96  242  2 0.                                                   =
= CM42   1002  -98 -242  3 2 0.756 0.100 4.925                                  =
= P338 100000438 99 242    0.                                                   =
= AM43    243  -96  243  4 0.                                                   =
= CM43   1003   98  243    0.784                                                =
= P339 100000339 99 243    0.                                                   =
= PF43   1004   98  244    0.                                                   =
= CM44    244  -98 -244  4 0.25 0.1233                                          =
= P340 100000340 99 244    0.                                                   =
=   193.7  197.0  202.0  204.4  202.8                                           =
= 10  37        38  5  18  2                                                    =
=ZR95 2040 40  95  12.24  6.50 5.58 4.89 3.83 3.23                              =
=MO95 2044 41  95   0.     0.   0.   0.   0.   0.                               =
=RU06 2057 44 106  2.1796 0.39 2.83 4.25 5.89 5.25                              =
=PD06 2062 45 106   0.     0.   0.   0.   0.   0.                               =
=CE44 2139 58 144   2.82  5.19 4.54 3.77 4.06 3.55                              =
=ND44 2146 59 144   0.     0.   0.   0.   0.   0.                               =
=PM47 2152 61 147  0.845  2.25 2.56 1.95 2.18 2.32                              =
=PM48 2153 61 148  0.149E+3  0.  0.  0.  0.  0.                                 =
=PM9M 2192  61 -148 0.5  0.1975E+2  0.  0.  0.  0.  0.                          =
=SM9P 2026  61  149        0.  1.07 1.84 1.24 1.43 1.61                         =
=SM49 2158  61  -149   1.  0.   0.   0.   0.   0.   0.                          =
```

Ajustements

```
=SM50 2159 61 150  0.    0. 0. 0. 0. 0.
=SM51 2160 61 151   0.   0.422 0.92 0.76 0.89 1.13
=SM52 2161  61 152   0.  0.265 0.548 0.576  0.707  0.910
=EU53 2165  63 153   0.  0.163 0.408 0.384  0.536  0.730
=EU54 2166  63 154   0.137   0.  0.  0.  0.  0.
=EU55 2167 63 155  0.55   0.0333  0.139  0.207  0.293  0.38
=GD55 100155 64 155   0.   0. 0. 0. 0. 0.
=GD56 2171 64 156  0.  0.0133   0.0748  0.0825  0.209  0.31
=GD57 2172 64 157  0.  0.00643  0.0379  0.0754  0.146  0.16
=TC99 2050  0.   6.13  6.42   6.43  6.22  5.36
=RH03 2058    0.   3.11  6.4  6.97  5.98  6.95
=AG09 2068    0.   0.027  0.27  1.38  3.75  3.29
=CD13 2073  0.  0.0128 0.0546 0.0839  0.165   0.20
=IN15 2077    0.   0.01   0.051  0.0846  0.04    0.007
=I129 2110    0.   0.853  0.653  1.69  1.01 1.0
=XE31 2117    0.   2.77  3.66  3.89  3.09  3.12
=CS33 2123    0.   6.77  6.47  6.84  6.61  5.82
=CS37 2127    0.   6.23  5.95  6.53  6.56  5.84
=ND43 2145    0.   5.99  4.53  4.46  4.41  4.23
=ND45 2147    0.   3.95  3.75  3.02  3.12  3.02
=ND49 2150    0.   1.65  2.40  1.66  1.87  2.00
= PSPF  779   0.   150.58  0.  0.  0.  0.
= PSPF  780   0.   0.  133.59  0.  0.  0.
= PSPF  781   0.   0.  0.  144.20  0.  0.
= PSPF  782   0.   0.  0.  0.  142.39  142.
=XE35 2121    0.2093E+4   6.72  5.75  7.21  7.29   6.49
=RH05  2059   0.5348E+3   0.947  3.18  5.39  5.88  6.02
=   FIND
= DEFI REUSS 11
=  235   2  1  1  52 99  1.0039
=  235   3  1  1  52 99  1.01012
=  235   6  1  1  52 99  1.01012
=  339   3  1  1   1 99  1.0063
= 100000339 3 1 1  1 99  1.0063
=  342   2  1  6  44 44  6.0
= 1002   2  2  6   1 76  8.5    1  77 99  16.0
= 1003   2  2  6   1 76 140.    1  77 99 825.0
= 2026   2  1  7   1 99
= 0.2348780E-02 0.1232760E-02 0.2074050E-02 0.3835390E-02 0.7411350E-02
= 0.1357200E-01 0.2081740E-01 0.3053620E-01 0.4366730E-01 0.6205450E-01
= 0.8831960E-01 0.1216500E 00 0.1873410E 00 0.2751030E 00 0.3617380E 00
= 0.4552520E 00 0.5754620E 00 0.7080170E 00 0.9051250E 00 0.1195180E 01
= 0.1620430E 01 0.2161360E 01 0.2954519E 01 0.4153469E 01 0.5881670E 01
= 0.5039880E 01 0.6028399E 01 0.7836570E 01 0.1031390E 02 0.1352680E 02
= 0.1723709E 02 0.2274139E 02 0.2873740E 02 0.3672139E 02 0.4415259E 02
= 0.5472589E 02 0.1039400E 03 0.1649490E 03 0.2377420E 03 0.1083320E 03
= 0.1651870E 03 0.9456490E 02 0.7771300E 02 0.2965759E 03 0.8361510E 02
= 0.7275729E 02 0.8554819E 03 0.1906860E 03 0.1586420E 03 0.7953750E 03
= 0.6440050E 02 0.8470679E 02 0.1161490E 03 0.1436560E 03 0.1615220E 03
= 0.1824200E 03 0.1885640E 03 0.2176300E 03 0.2222670E 03 0.2611899E 03
= 0.2677300E 03 0.3177000E 03 0.3229888E 03 0.3980898E 03 0.4155359E 03
= 0.5351399E 03 0.6221108E 03 0.8685498E 03 0.8685498E 03 0.2043200E 04
= 0.2635900E 04 0.1255210E 05 0.7509488E 04 0.2491150E 04 0.1350740E 04
= 0.1258490E 04 0.1365060E 04 0.1538990E 04 0.1775440E 04 0.2078840E 04
= 0.2501040E 04 0.3097570E 04 0.4052350E 04 0.5681777E 04 0.8381066E 04
= 0.15239.0E 05 0.3066890E 05 0.6106830E 05 0.1018650E 06 0.1042070E 06
= 0.7440800E 05 0.5344720E 05 0.4434810E 05 0.4222290E 05 0.4389060E 05
= 0.4901320E 05 0.5642860E 05 0.7174506E 05 0.1040110E 06
= FIND
= DEFI 1650
```

```
=3-:  2  40
=         1    86    86    1.00044E+00                                                    =
=    1   85    85 1.00056E+00    1   84    84 1.00069E+00    1   83                       =
=   83 1.00084E+00    1   82    82 1.00103E+00    1   81    81 1.00127E+00 =
=    1   80    80 1.00158E+00    1   79    79 1.00198E+00    1   78                       =
=   78 1.00256E+00    1   77    77 1.00346E+00    1   76    76 1.00519E+00 =
=    1   75    75 1.00873E+00    1   74    74 1.01591E+00    1   73                       =
=   73 1.03197E+00    1   72    72 1.07552E+00    1   71    71 1.27529E+00 =
=    1   70    70 1.79460E+00    1   69    69 5.39060E-01    1   68                       =
=   68 1.57418E+00    1   67    67 1.52737E+00    1   66    66 1.13375E+00 =
=    1   65    65 1.05988E+00    1   64    64 1.03524E+00    1   63                       =
=   63 1.02371E+00    1   62    62 1.01711E+00    1   61    61 1.01286E+00 =
=    1   60    60 1.00997E+00    1   59    59 1.00799E+00    1   58                       =
=   58 1.00656E+00    1   57    57 1.00549E+00    1   56    56 1.00468E+00 =
=    1   55    55 1.00399E+00    1   54    54 1.00317E+00    1   53                       =
=   53 1.00225E+00    1   52    52 1.00150E+00    1   51    51 1.00102E+00 =
=    1   50    50 1.00073E+00    1   49    49 1.00054E+00    1   48                       =
=                               48 1.00041E+00    1   47    47 1.00031E+00 =
=100000340  2 40                                                                          =
=    1   86    86 1.00044E+00    1   85    85 1.00056E+00    1   84                       =
=   84 1.00069E+00    1   83    83 1.00084E+00    1   82    82 1.00103E+00 =
=    1   81    81 1.00127E+00    1   80    80 1.00158E+00    1   79                       =
=   79 1.00198E+00    1   78    78 1.00256E+00    1   77    77 1.00346E+00 =
=    1   76    76 1.00519E+00    1   75    75 1.00873E+00    1   74                       =
=   74 1.01591E+00    1   73    73 1.03197E+00    1   72    72 1.07552E+00 =
=    1   71    71 1.27529E+00    1   70    70 1.79460E+00    1   69                       =
=   69 5.39060E-01    1   68    68 1.57418E+00    1   67    67 1.52737E+00 =
=    1   66    66 1.13375E+00    1   65    65 1.05988E+00    1   64                       =
=   64 1.03524E+00    1   63    63 1.02371E+00    1   62    62 1.01711E+00 =
=    1   61    61 1.01286E+00    1   60    60 1.00997E+00    1   59                       =
=   59 1.00799E+00    1   58    58 1.00656E+00    1   57    57 1.00549E+00 =
=    1   56    56 1.00468E+00    1   55    55 1.00399E+00    1   54                       =
=   54 1.00317E+00    1   53    53 1.00225E+00    1   52    52 1.00150E+00 =
=    1   51    51 1.00102E+00    1   50    50 1.00073E+00    1   49                       =
=   49 1.00054E+00    1   48    48 1.00041E+00    1   47    47 1.00031E+00 =
=FIND                                                                                     =
=   FINPROC                                                                               =

***   FSH   UO2 2.6%  16BP  EVOL COND NOM  306.3  -  650.57  **

=PARA  TECO  650.57  TEMO  306.3   FINP                                                   =
=EVOLUTION  INITIAL  METAL FRAIS                                                          =
=37.3057 1 1 1 10                                                                         =
=POISON 2 1 2 57 81  10  82 111                                                           =
= PF                                                                                      =
=PAS 0 PERFO  PBIBL  4  3000.  150.  1000.  3000.  24000.                                 =
= MAIL                                                                                    =
= MULTICEL                                                                                =
= RP1  0.2417056  RP2  0.4268631  RP3  0.4863963  RP4  0.5724355                          =
=  RP5  0.6131421  RP6  0.7135413                                                         =
= RT1  0.572435  RT2  0.6131421  RT3  0.7135413                                           =
= RC31 0.41266  RC32 0.474364  RC33 0.7135413                                             =
= RC31 0.41266  RC32 0.474364  RC33 0.7135413                                             =
= RC31 0.41266  RC32 0.474364  RC33 0.7135413                                             =
= RC31  0.41266 RC32 0.474364 RC33 0.7135413                                              =
= RC31 0.41266  RC32 0.474364  RC33 0.7135413                                             =
= RC31 0.41266  RC32 0.474364  RC33 0.7135413 RC34 0.728404                               =
=  DEFS  URAN PROP U235 0.026   U238 0.974   U236 0.0     NP37 0.0                         =
=     PU38 0.0      PU39 0.0      PU40 0.0     PU41 0.0     PU42 0.0                       =
=     P338 0.0      P339 0.0      P340 0.0     AM41 0.0     AM42 0.0                       =
```

```
=     CM42 0.0     AM43 0.0     CM43 0.0     PF43 0.0     CM44 0.0           =
= XE35 0.   SM9P  1.E-12  GD55 0.               FIND                         =
= DEFS  SSIN  PROP  SS304  0.7476114374 IN718  0.2523885625         FIND =
= DEFS  MEL   PROP  IN718  1.            ABSPF  0.                  FIND =
= DEFS  CFUF  PROP  ACI6  0.9999  CFUS  0.0001                  FIND        =
= DEFS  SILICATE  PROP  AL27  1.1643511E-02    B10  7.1272189E-03          =
=             B111  3.1716446 5E-02  SI28  3.7631736E-01  NA23  2.81905E-02=
=      K39  4.1506867E-03  OXYG  5.3585418E-01  BIOON  0.005      FIND     =
= COMPO                                                                      =
= RP1 EAU  1.  DENS 0.7129 SOLU BNAT 600.E-06  DILU 0. SS304                 =
=  DENS  1.10291825353                                                       =
= RP2  EAU 1.  DENS 0.7129  SOLU BNAT 600.E-06 DILU 0.                       =
=    SILICATE  DENS  2.2476859                                               =
= RP3 EAU 1. DENS 0.7129  SOLU BNAT 600.E-06 DILU 0.                         =
=          SS304  DENS  6.2666535                                            =
= RP4 EAU 1. DENS 0.7129  SOLU BNAT 600.E-06                                 =
=  RP5  ZR4  1.  DENS  6.48502083                                            =
= RP6 EAU 1. DENS 0.7129  SOLU BNAT 600.E-06 DILU                            =
=          0.950378963  SSIN  DENS  7.874998867                              =
= RT1 EAU 1. DENS 0.7129 SOLU BNAT 600.E-06                                  =
= RT2  ZR4  1.  DENS  6.51794                                                =
= RT3 EAU 1. DENS 0.7129  SOLU BNAT 600.E-06                                 =
=                            DILU  0.950378963 SSIN DENS  7.98053            =
= RC31 URAN  OXYDE  1.  DENS  10.07005                                       =
= RC32 ZR4  1.  DENS  6.49012  DILU  0.9408406  GAP  DENS  0.                =
= RC34 EAU 1. DENS 0.7129 SOLU BNAT 600.E-06                                 =
= RC33 EAU 1. DENS 0.7129  SOLU BNAT 600.E-06                                =
=                            DILU  0.9943102 MEL    DENS  8.126193           =
= AJUSTEMENT                                                                 =
= CALMULT  REUSS T650                                                        =
=  STANDARD     2  0.22519E-3  0.6823E-4                                     =
= POSTEV 0                                                                   =
= 1  1  0.  0.7135413  MACRO4  MICH       EVOE  1007  71                     =
=14 11 18 235 236 100238 339 340 241 342 728 2121 2026 10 111                =
= 1  2  0.  0.7135413  MACRO4  MICH       EVOE  1007  72                     =
=14 11 18 235 236 100238 339 340 241 342 728 2121 2026 10 111                =
= 1  3  0.  0.7135413  MACRO4  MICH       EVOE  1007  73                     =
=14 11 18 235 236 100238 339 340 241 342 728 2121 2026 10 111                =
= 1  4  0.  0.7135413  MACRO4  MICH       EVOE  1007  74                     =
=14 11 18 235 236 100238 339 340 241 342 728 2121 2026 10 111                =
= 1  5  0.  0.7135413  MACRO4  MICH       EVOE  1007  75                     =
=14 11 18 235 236 100238 339 340 241 342 728 2121 2026 10 111                =
= 1  6  0.  0.7135413  MACRO4  MICH       EVOE  1007  76                     =
=14 11 18 235 236 100238 339 340 241 342 728 2121 2026 10 111                =
= 1   7 0.  0.7135413  MACRQ4  MICH       EVOE  1007              77         =
=14 11 18 235 236 100238 339 340 241 342 728 2121 2026 10 111                =
=  1  8  0. 0.728404 MACRO4  MICH    EVOE 1007  810                          =
=14 11 18 235 236 100238 339 340 241 342 728 2121 2026 10 111                =
=100 MACRO4 MICH EVOE 1007 820                                               =
=14 11 18 235 236 100238 339 340 241 342 728 2121 2026 10 111                =
=100 MACRO2 MICH EVOE 1007 820                                               =
=14 11 18 235 236 100238 339 340 241 342 728 2121 2026 10 111                =
= POSTURE 100 MACRO2 NEPT INIT 0 15 UOP4 3 11 BORE 2121 XENON 2026 SAMA  =
= FIN   FINI                                                                 =


MAXPTS   29    MAXMIL   13    MAXFIS   12    MAXISO   41    MATHER   47    MAXGRO  100    MAXTRA    19922
```